



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHOTT
solar

Förderprogramm des BMU zu Forschung und Entwicklung im Bereich Photovoltaik

Entwicklung mikromorpher Si-Dünnschichttechnologie für großflächige PV-Module II

FKZ: 0327636A

Laufzeit: 01.01.2010 – 31.12.2010

Öffentlicher Schlussbericht

Dr. Michael Berginski, Sonia Dandl, Walter Frammelsberger, Robert Geyer,
Dr. Volker Hagemann, Andreas Haslauer, Peter Lechner, Dr. Robert Lechner,
Walter Psyk, Jörg Reuner, Dr. Urban Weber

SCHOTT Solar Thin Film GmbH
Phototronics
Hermann-Oberth-Straße 11
D-85640 Putzbrunn

Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Verantwortung für den
Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Entwicklung mikromorpher Si-Dünnschichttechnologie für großflächige PV-Module II	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Berginski, Michael; Dandl, Sonia; Frammelsberger, Walter; Geyer, Robert; Hagemann, Volker; Haslauer, Andreas; Lechner, Peter; Lechner, Robert; Psyk, Walter; Reuner, Jörg; Weber, Urban	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2010
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) SCHOTT Solar Thin Film GmbH Phototronics Hermann-Oberth-Straße 11 D-85640 Putzbrunn	10. Förderkennzeichen 0327 636 A
	11. Seitenzahl 48
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn	13. Literaturangaben 3
	14. Tabellen 8
	15. Abbildungen 30
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Der vorliegende Bericht beinhaltet Arbeiten zur Weiterentwicklung der mikromorphen Silizium-Tandemzellen Technologie. Er behandelt die Themen PECVD–Prozess, Optimierung des Zellenwirkungsgrades, Lagerstabilität, STC-Leistungsmessung und innovative Serienschaltung. Darüber hinaus werden die Themen Light-Management und Charakterisierung speziell beleuchtet. Auf Zellebene wurde ein initialer Wirkungsgrad von 13 % erreicht. Auf 1,4 m² großer Fläche wurden 143 W initiale und 122 W stabile STC-Leistung erzielt.	
19. Schlagwörter Si-Dünnschichttechnologie: a-Si, μc-Si, mikromorph (a-Si/μc-Si), Dünnschichtsolarzellen, Photovoltaik (PV)	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Development of Micromorph Thin-Film Technology for Large Area PV Modules	
4. author(s) (family name, first name(s)) Berginski, Michael; Dandl, Sonia; Frammelsberger, Walter; Geyer, Robert; Hagemann, Volker; Haslauer, Andreas; Lechner, Peter; Lechner, Robert; Psyk, Walter; Reuner, Jörg; Weber, Urban	5. end of project 2010-12-31
	6. publication date
	7. form of publication
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) SCHOTT Solar Thin Film GmbH Phototronics Hermann-Oberth-Straße 11 D-85640 Putzbrunn	9. originator's report no.
	10. reference no. 0327 636 A
	11. no. of pages 48
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn	13. no. of references 3
	14. no. of tables 8
	15. no. of figures 30
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract This report deals with fundamental issues on further developing the micromorph silicon tandem cell technology. Main topics are optimisation of the PECVD processes, the development of high efficiency cells, stability of cells, light-management, characterisation of layers and cells, innovative series connection and STC-power measurement. Champion cells with 13 % initial efficiency were demonstrated. large area 1.4 m² modules with 143 W initial and 123 W stabilised power were realised.	
19. keywords Si thin-film technology: a-Si, μc-Si, micromorph (a-Si/μc-Si), thin-film solar cells, photovoltaics (PV)	
20. publisher	21. price

Ergebnisse

- 1. Untersuchung von PECVD-Regimen**
- 2 Mikromorphe Zellentwicklung**
 - 2.1 Topzellentwicklung**
 - 2.2 Dunkelalterung von mikrokristallinen Siliziumzellen**
 - 2.3 Einfluss des Depositionsregimes auf die Stabilität**
 - 2.4 Lichtalterung von Tandemzellen**
 - 2.5 Rekordzellen und – module**
 - 2.6 Metrologie mit idealer Komponenten-Referenzzelle**
 - 2.7 Metrologie mit idealen Komponenten-Referenzmodulen**
 - 2.8 Innovative Serienverschaltung**
- 3. Charakterisierung**
 - 3.1 Erweiterung der Raman-Spektroskopie**
 - 3.2 Bestimmung der Eindiffusion von schwerem Wasser (D₂O)**
- 4. Light-Management**
 - 4.1 Neuartige TCO-Strukturen**
 - 4.2 SunShine Modellierung**

1. Untersuchung von PECVD-Regimen

Im Zuge der PECVD-Entwicklung zur Abscheidung von mikrokristallinen Zellen wurden unterschiedliche Bedingungen für die Plasmaanregung untersucht.

Bei gegebener Anlagenkonfiguration lassen sich die „weichen“ Parameter wie Gasflüsse und die Hochfrequenzleistung variieren, im eingeschränkten Masse auch der Prozessdruck und die Reaktor- bzw. Substrattemperatur. Nur über apparative Änderungen erhält man Zugriff auf die „harten“ Parameter, wie dem Elektroden-Substratabstand, dem Elektrodendesign und der Frequenz der Plasmaanregung. Diese erweitern den Parameterraum zusätzlich und wirken sich außerdem auch auf die zuvor genannten „weichen“ Parameter aus. Insbesondere der Prozessdruck bei dem sich ein stabiles Plasma bildet, wird vom Abstand der HF-Elektrode zum Substrat bzw. der geerdeten Elektrode des Reaktors mitbestimmt.

Über Variationen im Prozess und Experimenten an verschiedenen Anlagen wurde so der Einfluss der oben genannten Parameter auf die Qualität der hiermit deponierten mikrokristallinen Zelle untersucht. In jedem Fall war es dabei notwendig durch die Veränderung sowohl des Silangasflusses als auch der Hochfrequenzleistung das Optimum in der Zellqualität durch die Beeinflussung der Raman-Kristallinität RC zu suchen. Für Prozesse die bei relativ niedrigem Prozessdruck erfolgten, war es vorteilhaft eine Raman-Kristallinität im Bereich von 60 % oder kleiner einzustellen, dies im Speziellen auch für eine möglichst große Stabilität gegenüber einer Lagerung an Atmosphäre. Die Prozesse bei höherem Druck lieferten dagegen ein Material das auch bei einer Raman-Kristallinität von bis zu 70 % eine hohe Qualität zeigt. Dies wurde insbesondere durch gute Füllfaktoren im Bereich von 70 % in mikrokristallinen Zellen nachgewiesen. Außerdem erwies sich dieses Material als relativ unempfindlich gegenüber atmosphärischen Einflüssen, was für ein kompaktes Material mit einer geringen Porosität spricht.

In Tabelle 1.1 sind die untersuchten Prozessregime mit der damit erzielten besten mikrokristallinen Zelle gelistet. Der angegebene Wirkungsgrad ist dabei derjenige, den die mikrokristalline Teilzelle in der mikromorphen Tandemzelle liefern würde, mit einer amorphen Topzelle als optischem Filter. Als Parameter aufgeführt ist hier auch die Depositionsrate. Diese ist zwar nicht direkt einzustellen, sondern ergibt aus der Wahl der anderen Parameter. Es kann aber vermutet werden, dass die Depositionsraten einen Einfluss auf die Qualität der Zelle haben kann.

RF-Frequenz	40 MHz	40 MHz	40 MHz	40 MHz	40 MHz	13 MHz	13 MHz
Druck	low	mid	mid	mid	high	high	high
Elektrodenabstand	high	high	mid	mid	mid	mid	low
H ₂ -Verdünnung	low	high	high	low	high	high	high
Depositionsrate	high	low	high	low	low	low	high
Zellwirkungsgrad (%)	3,44	3,86	3,99	3,77	4,08	3,95	4,27

Tabelle 1.1: Gegenüberstellung der untersuchten Prozessregime für mikrokristalline Si-Absorberschichten und des damit erzielten besten Wirkungsgrades von mikrokristallinen Teilzellen

Für ein echtes „Screening“ des Einflusses und auch der Relevanz der jeweiligen Parameter gibt nicht genügend Experimente um eine statistisch betrachtet einwandfreie Aussage zu treffen. Selbst bei einem Weglassen des Elektroden-Substratabstands als Parameter wären in einem klassischen Screening noch 18 Experimente notwendig. Dies lässt sich aber durch die oben erwähnten Einschränkungen bei der Parameterwahl nicht so einfach umsetzen. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse Parameter für Parameter, lässt sich klar erkennen dass es für eine hohe Zellqualität vorteilhaft ist einen möglichst hohen Prozessdruck, bei einem damit verbundenen kleinen Elektroden-Substratabstand zu wählen. Ebenfalls zu bevorzugen ist eine hohe Verdünnung des Silangases mit Wasserstoffgas.

Die Anregungsfrequenz und die Depositionsratescheinen dagegen von untergeordneter Bedeutung zu sein oder zeigen überhaupt keine Relevanz innerhalb der untersuchten Grenzen.

In Bild 1.1 ist das Ergebnis der in Tabelle 1.1 gelisteten Experimente mittels einer statistischen Auswertung dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse separat nach den einzelnen Parametern ausgewertet. Die oberen Grafiken zeigen die Ergebnisse des statistischen Modells aus wahren über vorhergesagtem Wirkungsgrad. Die rote Linie stellt den linearen Fit des Modells für den jeweiligen Parameter dar. Die echten Datenpunkte sind ebenfalls gezeigt. Die gestrichelten roten Kurven geben den Vertrauensbereich des Modells wieder während die wagerechte blaue Linie den Mittelwert über alle gemessenen Datenpunkte darstellt. Es gilt nun, dass ein bewerteter Parameter nur dann von Relevanz ist, wenn der aus dem Modell vorhergesagte Bereich, in der Grafik eingegrenzt durch die beiden gestrichelten roten Kurven, dem sogenannten Vertrauensbereich, den generellen Mittelwert wenigstens schneidet. Dies trifft für die Parameter Druck und Verdünnung zu, nicht aber für Frequenz und Rate.

In den unteren Grafiken ist der Einfluss des Parameters auf den Wirkungsgrad gezeigt. Auch aus dieser Darstellung lässt sich die Bedeutung des jeweiligen Parameters aus der Steilheit der Verbindungsgeraden im Verhältnis zu dem Vertrauensbereich bewerten, der in diesem Fall durch den vertikalen Linienabschnitt für jeden Wertebereich dargestellt ist.

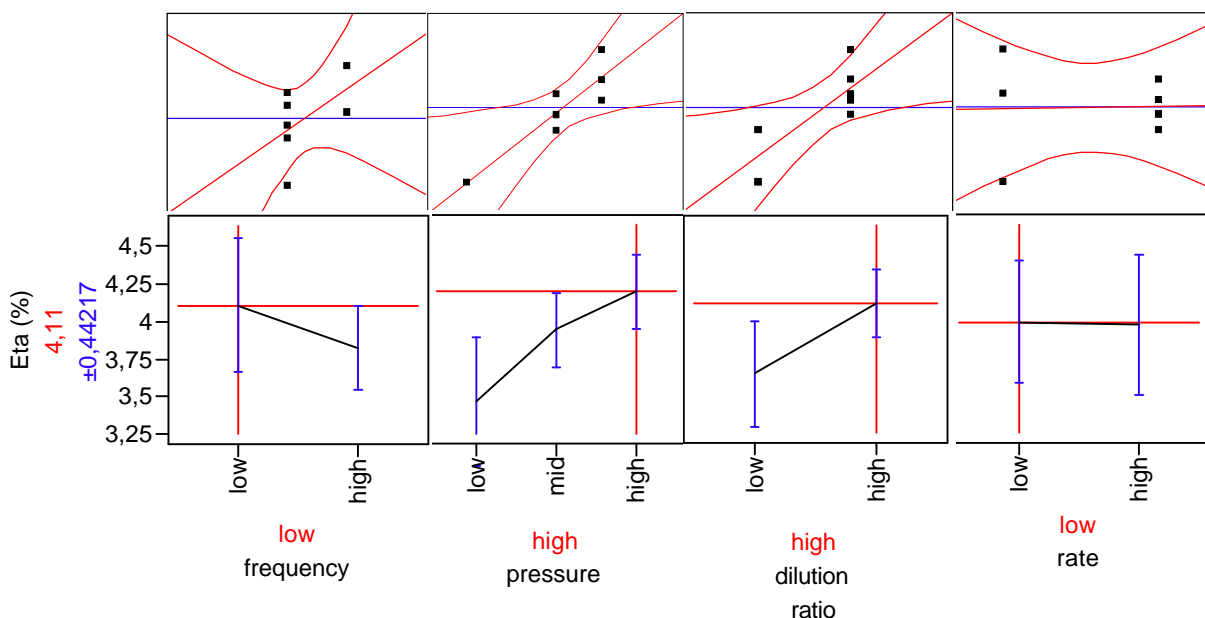


Abb. 1.1 Screening des Einflusses und der Relevanz verschiedener Parameter auf die Zellqualität der mikrokristallinen Teilzelle

2 Mikromorphe Zellentwicklung

2.1 Topzellentwicklung

Bei der Entwicklung und Optimierung der Topzelle wurden im Rahmen dieses Projektes drei Themenbereiche bearbeitet:

- Erhöhung der Kurzschlussstromdichte bei geringen Absorberdicken
- Verbesserung der offenen Klemmenspannung im stabilisierten Zustand
- Verringerung der Licht-induzierten Degradation (LID)

Erhöhung der Kurzschlussstromdichte bei geringen Absorberdicken

Um in einer mikromorphen Tandemzelle einen guten Wirkungsgrad zu erzielen, müssen Top- und Bottomzelle den gleichen Strom liefern. Dieses „Matching“ der Ströme kann grundsätzlich über die Dicken der beiden Absorberschichten eingestellt werden. Begrenzend wirkt dabei jedoch insbesondere die amorphe Topzelle, die mit dicker Absorberschicht zu einer entsprechend stärkeren Lichtalterung tendiert und damit nicht wirklich Wirkungsgrad gewinnt.

Um diese Problematik zu entschärfen, kann man versuchen den Brechungsindex der mikrokristallinen n-Schicht (n- $\mu\text{c-Si}$ Schicht) der Topzelle zu verringern und so den Brechungsindexsprung zwischen i-a-Si Schicht und n- $\mu\text{c-Si}$ Schicht zu vergrößern. Dadurch wird an dieser Stelle mehr Licht in die Topzelle reflektiert. Die Topzelle kann so ohne eine Vergrößerung der i-Schichtdicke mehr Licht absorbieren und entsprechend mehr Strom liefern. Die Reduktion des Brechungsindexes kann durch eine Legierung von Silizium mit Sauerstoff realisiert werden. Dazu wird während der Gasphasenabscheidung dem Silan CO_2 beigemischt. Basierend auf Versuchsreihen mit a-Si/a-Si Tandemzellen wurden geeignete Prozessparameter für eine n- $\mu\text{c-SiO}$ -Schicht definiert, die den gewünschten optischen Effekt liefert und trotzdem keine negativen Auswirkungen auf den Füllfaktor und V_{oc} hat.

Die so optimierte n- $\mu\text{c-SiO}$ -Schicht wurde dann auf die mikromorphe Zelle portiert. Zusätzlich wurde die Dicke der n- $\mu\text{c-SiO}$ -Schicht zwischen 20 nm und 100 nm variiert. Die in Abb. 2.1 dargestellten Quantenausbeutemessungen an diesen Zellen belegen eindrucksvoll den Vorteil für die Topzelle. Bei konstant gehaltener Absorberdicke von etwa 220 nm lässt sich die Kurzschlussstromdichte j_{sc} in der Topzelle von 10,9 mA/cm^2 bei Verwendung der Standard n- $\mu\text{c-Si}$ -Schicht auf 12,6 mA/cm^2 für eine 80 nm dicke n- $\mu\text{c-SiO}$ -Schicht erhöhen. Gleichzeitig verliert allerdings die Bottomzelle überproportional Strom, j_{sc} sinkt von 12,6 mA/cm^2 auf 9,1 mA/cm^2 , so dass auch die Kurzschlussstromdichte der mikromorphen Zelle insgesamt abnimmt.

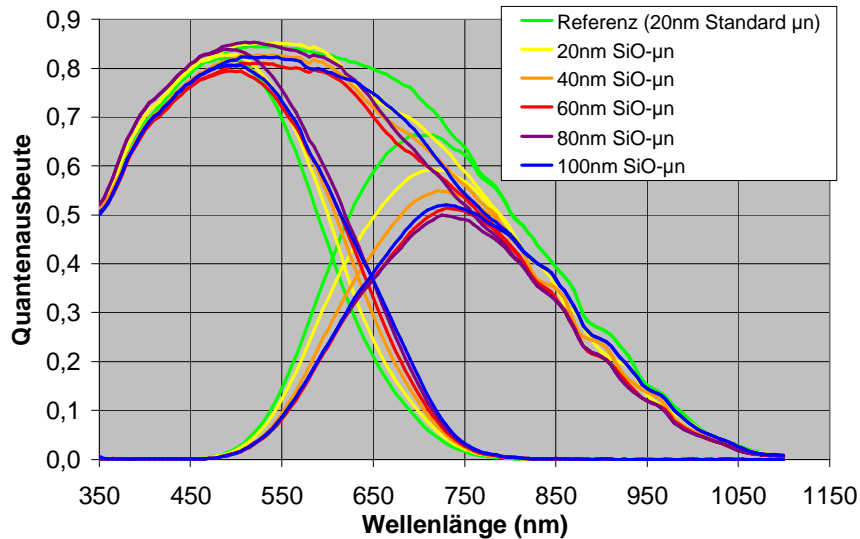


Abb. 2.1 Quantenausbeute-Messungen an mikromorphen Zellen mit unterschiedlich lang abgeschiedener und unterschiedlich dicker n- μ c-SiO-Schicht

Erhöht man die Dicke der Bottomzelle, kann dieser zwar Effekt ausgeglichen werden, dies ist aber keinesfalls eine produktionsfreundliche Maßnahme. In Abb. 2.2 sind entsprechende Quantenausbeutemessungen gezeigt. Die Absorberdicke der Topzelle wurde hier konstant gehalten, die Dicke der n- μ c-SiO-Schicht bei ca. 60 nm.

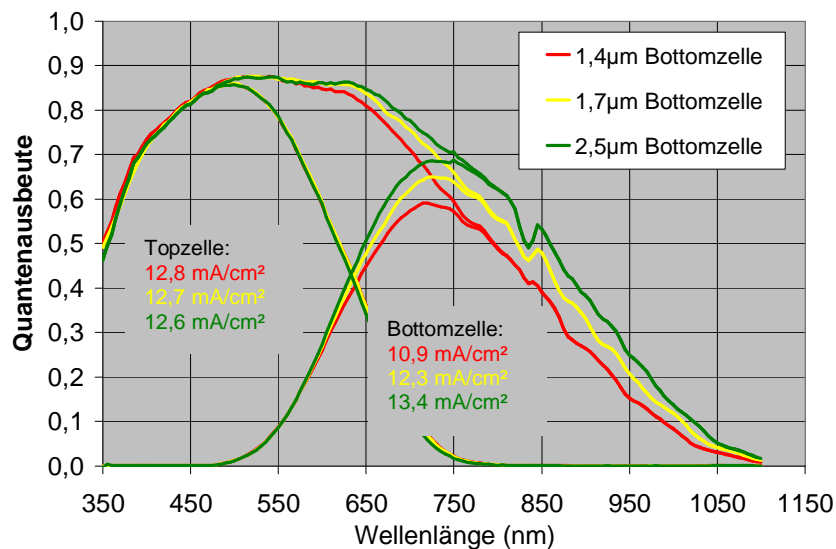


Abb. 2.2 Quantenausbeute von mikromorphen Zellen mit unterschiedlich dicker Bottomzelle

Die insgesamt vergleichsweise hohen Werte sind auf die Verwendung von Substraten mit zusätzlicher Antireflexschicht zurückzuführen.

Initial konnten somit sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Trotz anfänglich höherem Wirkungsgrad liegen Zellen mit n- μ c-SiO-Schicht nach 1000 Stunden Lichtalterung allerdings auf dem gleichen Niveau wie die Referenz, zum Teil sogar darunter. Der

Unterschied in der Alterung jedoch nicht alleine Licht-induziert, sondern auf ein instabiles Verhalten der n- μ c-SiO-Schicht zurückzuführen. Diese Vermutung beruht auf der beobachteten Dunkelalterung von Zellen, die eine n- μ c-SiO-Schicht enthalten. Nachmessungen von Zellen mit Standard n- μ c-Si-Schicht sind im Rahmen der Messungengenauigkeit mit den Erstmessungen identisch, wohingegen Zellen mit n- μ c-SiO-Schicht durch simple Lagerung innerhalb von wenigen Wochen im Füllfaktor und V_{oc} und damit im Wirkungsgrad um 5 % und mehr verlieren.

Ursache für diese Alterung ist möglicherweise ein struktureller Unterschied der beiden μ c-n-Schichten. SEM-Aufnahmen von unterschiedlichen rein amorphen Tandemzellen zeigen, dass die n- μ c-SiO-Schicht feinkörniger erscheint als die Standard μ c-Si-Schicht (Abb. 2.3). Dass es sich dabei nicht nur um einen optischen Eindruck handelt, wird auch durch eine TOF-SIMS-Charakterisierung der Proben nach 7 Wochen Lagerung in gesättigter D₂O-Dampf-atmosphäre bestätigt (siehe Abb. 2.4). Die Analyse zeigt deutliche erhöhte D- und O-Konzentrationen und belegt damit, dass die μ c-SiO-Schicht mehr D₂O aufnimmt und damit eine höhere Porosität aufweist im Vergleich zu μ c-Si-Schichten.

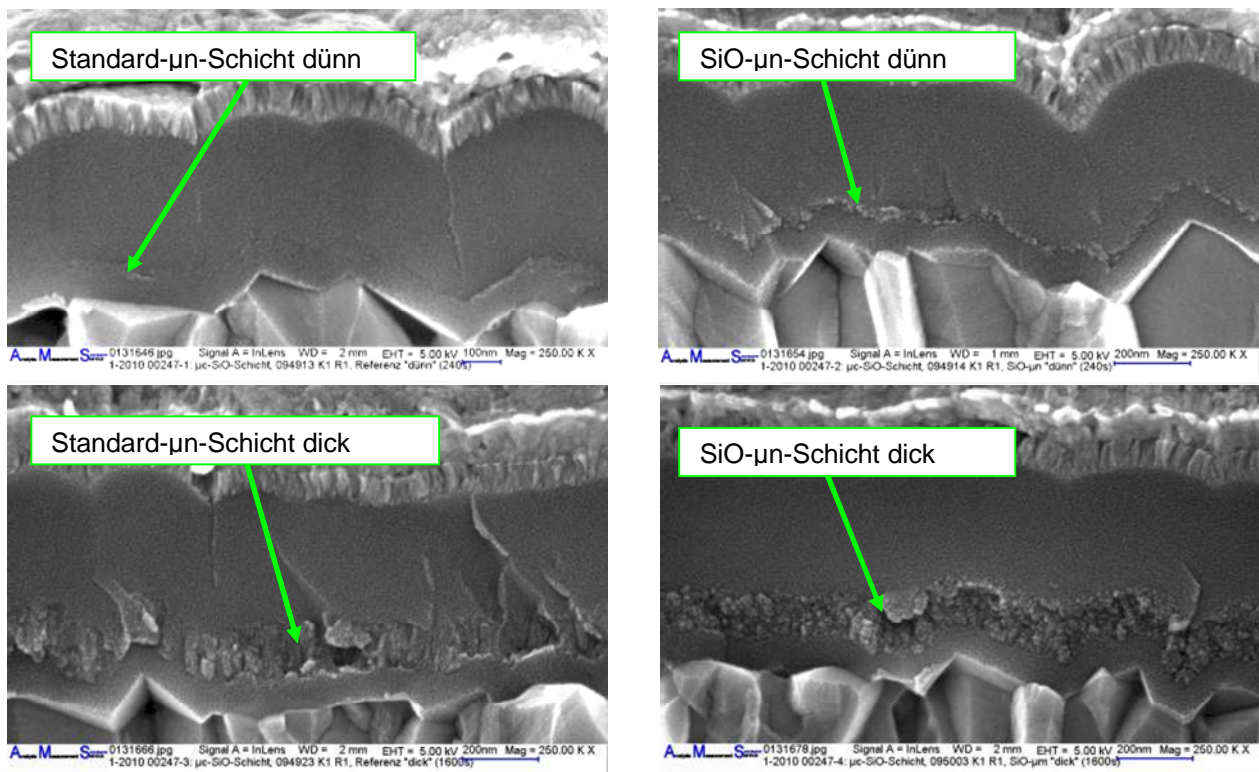


Abb. 2.3 SEM-Kantenbruchbilder von amorphen Tandemzellen mit Standard n- μ c-Si-Schicht und mit n- μ c-SiO-Schicht

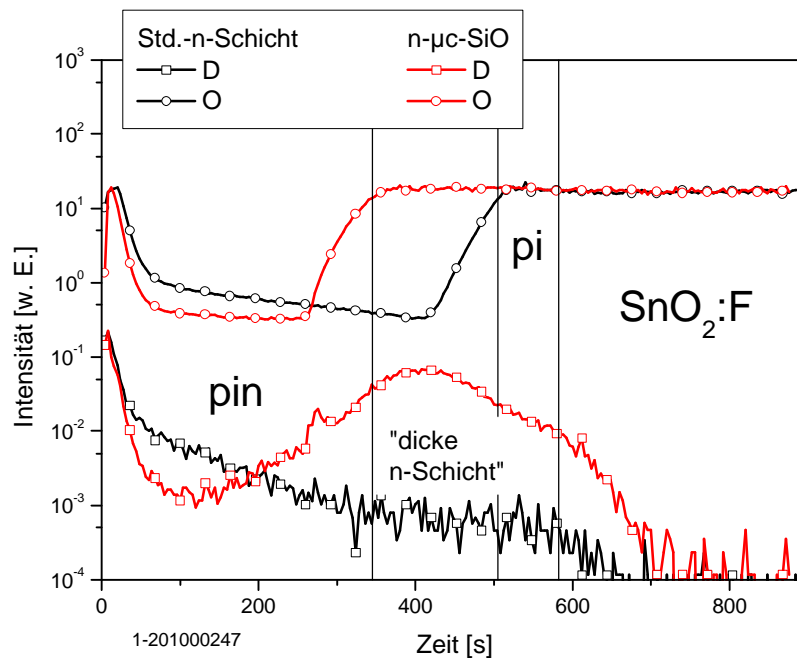


Abb. 2.4 TOF-SIMS-Charakterisierung. Vergleich der D- und O-Profile der amorphen Tandemzellen mit dicker n-μc-Si- bzw. n-μc-SiO-Schicht nach 7 Wochen Lagerung in D₂O-Atmosphäre (skaliert auf ³⁰Si-Intensität)

Ein alternativer Ansatz wurde versucht mit einer zusätzlichen zwischen Top- und Bottomzelle eingefügten ZnO-Schicht. In einer Versuchsreihe wurde die Absorberdicke der Topzelle zwischen 160 nm und 240 nm variiert und jeweils mikromorphe Zellen ohne ZnO-Zwischenschicht, mit 40 nm sowie mit 60 nm ZnO-Zwischenschicht verglichen. In Abb. 2.5 sind die Kurzschlussstromdichten j_{sc} dieser Proben dargestellt. Ohne ZnO-Zwischenschicht wirkt die Topzelle ganz klar limitierend. Mit zunehmender Absorberdicke in der Topzelle steigt die Kurzschlussstromdichte entsprechend bis auf 11,8 mA/cm² an. Mit 40 nm ZnO-Zwischenschicht werden schon bei 200 nm Topzellen-Absorberdicke 12 mA/cm² erreicht, mit 60nm ZnO-Zwischenschicht liefern 160 nm Topzelle sogar schon 11,9 mA/cm².

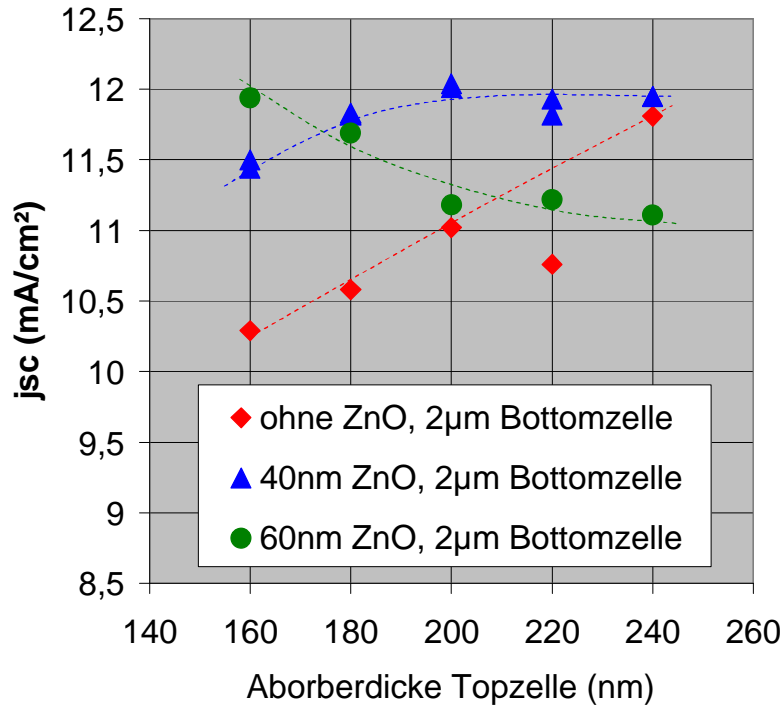


Abb. 2.5 Kurzschlussstromdichte von mikromorphen Zellen mit unterschiedlicher Absorberdicke der Topzelle. Verglichen werden Zellen ohne zusätzliche ZnO-Schicht zwischen Top- und Bottomzelle und Zellen mit 40 nm bzw. 60 nm ZnO-Zwischenschicht

Grundsätzlich zeigen diese Versuche den gewünschten Effekt, man erreicht auch mit geringeren Absorberdicken in der Topzelle gute Stromdichten. Betrachtet man allerdings entsprechende Quantenausbeutemessungen (siehe Abb. 2.6), wird deutlich, dass auch hier die Bottomzelle überproportional verliert.

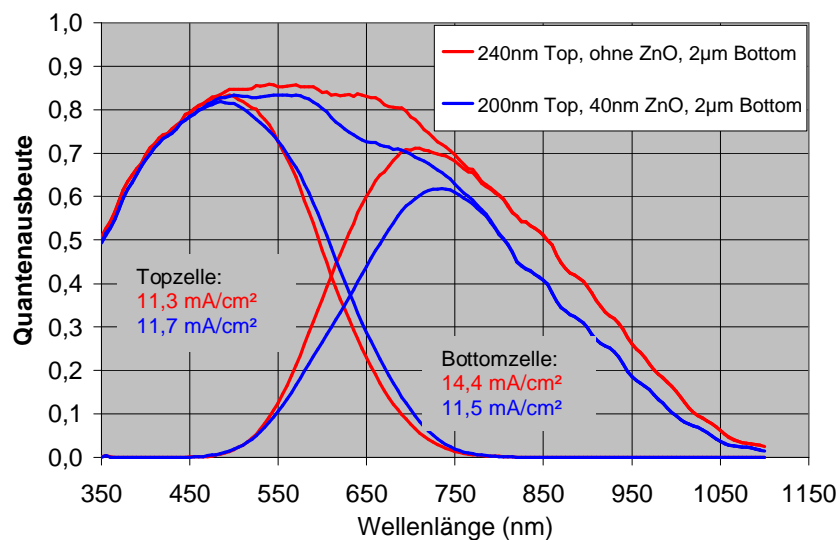


Abb. 2.6 Vergleich von Quantenausbeutemessungen an mikromorphen Zellen mit und ohne ZnO-Zwischenschicht

Ohne ZnO-Zwischenschicht liefert die 2 μm dicke Bottomzelle 14,4 mA/cm^2 Kurzschlussstromdichte. In Kombination mit einer 240 nm dicken Topzelle ergibt sich jedoch ein deutliches Mismatch von Strömen aus Top- und Bottomzelle. Mit 40 nm ZnO-Zwischenschicht sind Top- und Bottomzelle trotz einer gleichzeitig verringerten Absorberdicke in der Topzelle gematcht, dem Gewinn von 0,45 mA/cm^2 in der Topzelle steht aber ein Verlust von 2,85 mA/cm^2 in der Bottomzelle gegenüber. Die ZnO-Schicht ist nachgewiesenermaßen so transparent, dass der Verlust nur zu einem geringen Anteil durch Absorption in dieser zusätzlichen Schicht entstanden sein kann. Reflexionsmessungen (Abb. 2.7) an Zellen mit und ohne ZnO-Zwischenschicht zeigen, dass die ZnO-Zwischenschicht ein erhöhtes reflektiertes Spektrum bei 650 bis 700 nm aufweist, Licht, welches effektiv für die Absorberschicht verloren ist.

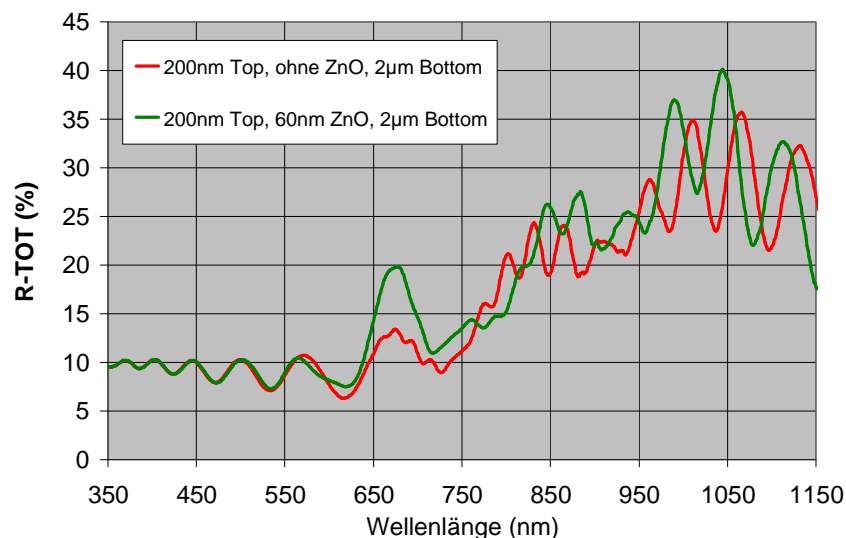


Abb. 2.7 Reflexionsmessungen an mikromorphen Zellen mit und ohne ZnO-Zwischenschicht

Grundsätzlich zeigt sich bezüglich der Reflexion zwar dieser kleine Nachteil für Zellen mit ZnO-Zwischenschicht, aber der Effekt reicht bei weitem nicht aus, um den deutlichen Verlust in der Quantenausbeute zu erklären. Man muss davon ausgehen, dass es sich nicht nur um optische Verluste sondern vor allem um in der Bottomzelle rekombinierte Ladungsträger handelt. Ursache könnte sein, dass die Zwischenschichten die Aufwuchsbedingungen für die Bottomzelle negativ beeinflussen und so die Stromsammlung verschlechtern.

Verbesserung der offenen Klemmenspannung im stabilisierten Zustand

Die amorphe Topzelle erreicht typischerweise eine initiales V_{oc} von etwa 900 mV, wobei stabilisierte Werte nach 1000 h Lichtalterung dann bei etwa 860 mV liegen. Bei Screeningversuchen, die nahe am Übergang amorph zu mikrokristallin stattfanden, also ein für amorphe Topzellen untypischer Arbeitsbereich, wurden in Einzelfällen Spannungen bis zu 939 mV gemessen. Die Füllfaktoren lagen trotz großer Schichtdicke noch bei 64 %. Diese Beobachtungen wiesen Ähnlichkeiten mit den vom Forschungszentrum Jülich berichteten Ergebnissen auf, wo amorphe Zellen, die bei niedrigerer Temperatur und mit hoher Wasserstoffverdünnung abgeschieden wurden nach Lichtalterung extrem hohe Leerlaufspannungen von bis zu 950 mV zeigten.

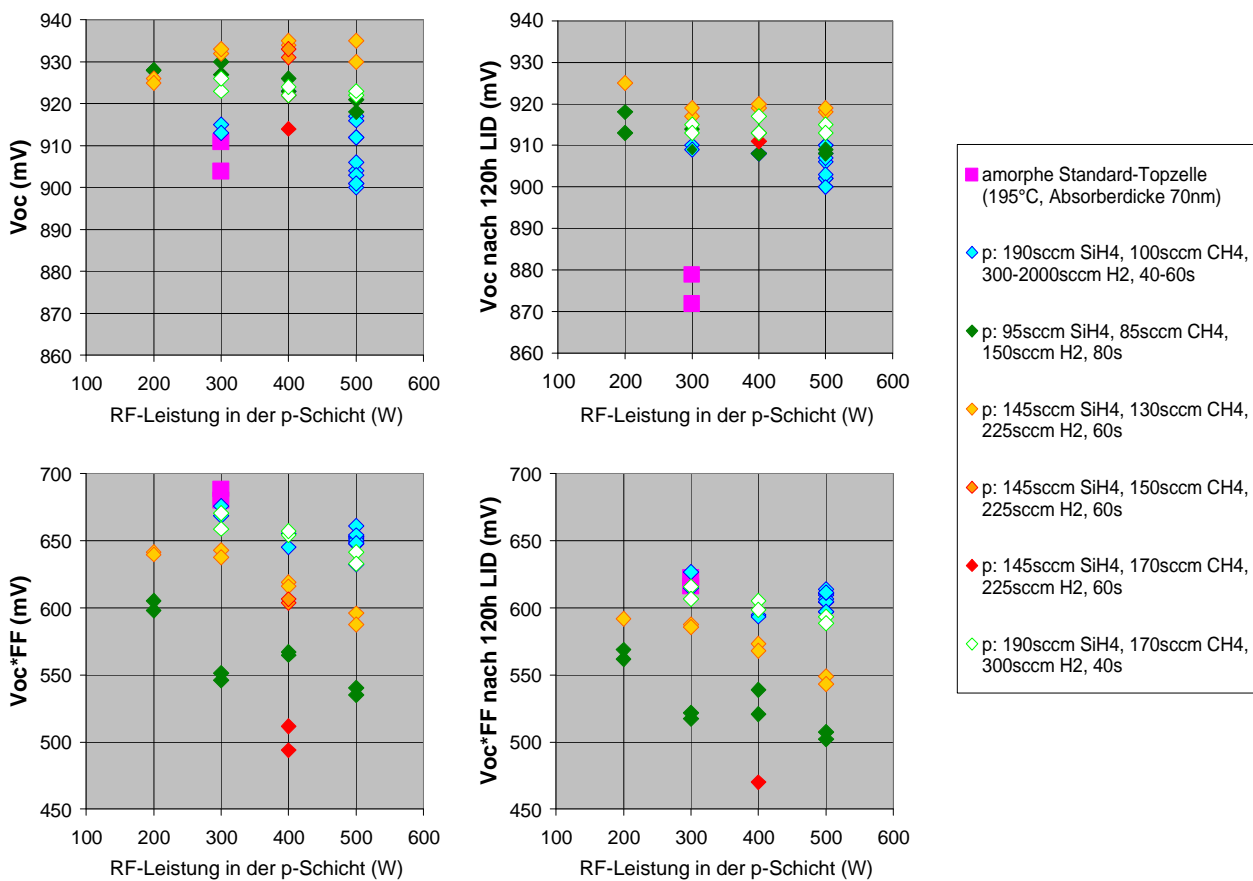


Abb. 2.8 Elektrische Zelldaten von amorphen Topzellen mit Variation der p-Schicht. Dargestellt sind V_{oc} sowie das Produkt V_{oc} *Füllfaktor jeweils initial und nach 120 h Lichtalterung

Aufgrund des ebenfalls starken Einflusses der p-Schicht auf die Zellergebnisse, insbesondere auch auf die Spannung, wurden Gasflüsse sowie die eingespeiste RF-Leistung für die p-Schicht variiert. Entsprechende Zellergebnisse sind in Abb. 2.8 dargestellt.

Als Referenz wurde eine Topzelle mit gleichbleibender Schichtdicke, abgeschieden bei 195°C, gewählt. Dadurch liegen die Kurzschlussstromdichten aller dargestellten Zellen auf einem ähnlichen Niveau. Neben V_{oc} wurde das Produkt aus V_{oc} und Füllfaktor betrachtet. Initial wurden hohe Spannungen von bis zu 935 mV und damit ein Vorteil von bis zu 25 mV gegenüber der Referenz erreicht. Nach 120 h Lichtalterung wird der Unterschied noch größer: die Referenz verliert in dieser Zeit bereits 30 mV, die Zellen der Versuchsgruppe bleiben im V_{oc} deutlich stabiler und verlieren im Mittel nur etwa 10 mV. Im Füllfaktor lieferte die Referenz initial sehr gute 76 % und erreichte damit auch im Produkt $FF \cdot V_{oc}$ insgesamt den besten Wert. Nach 120 h Lichtalterung liegen zumindest einzelne Zellen der Versuchsgruppe hier auf dem gleichen Niveau wie die Referenz.

Verringerung der lichtinduzierten Degradation

Wie in den beiden vorangegangenen Punkten deutlich zu sehen war, muss bei einer Verbesserung der initialen Zelldaten grundsätzlich auch das Lichtalterungsverhalten mit berücksichtigt werden. Konsequenterweise besteht eine Möglichkeit die Zelle zu optimieren somit auch darin, gezielt das Lichtalterungsverhalten zu beeinflussen. In den folgenden Serien wurde eine geringere Abscheiderate für die i-Schicht untersucht. Die Abscheide-Prozessparameter für die i-Schichten wurden so gewählt, dass daraus unterschiedliche Abscheideraten resultieren. Eine Serie wurde mit Referenz i-Schicht, aber ohne Buffer abgeschieden.

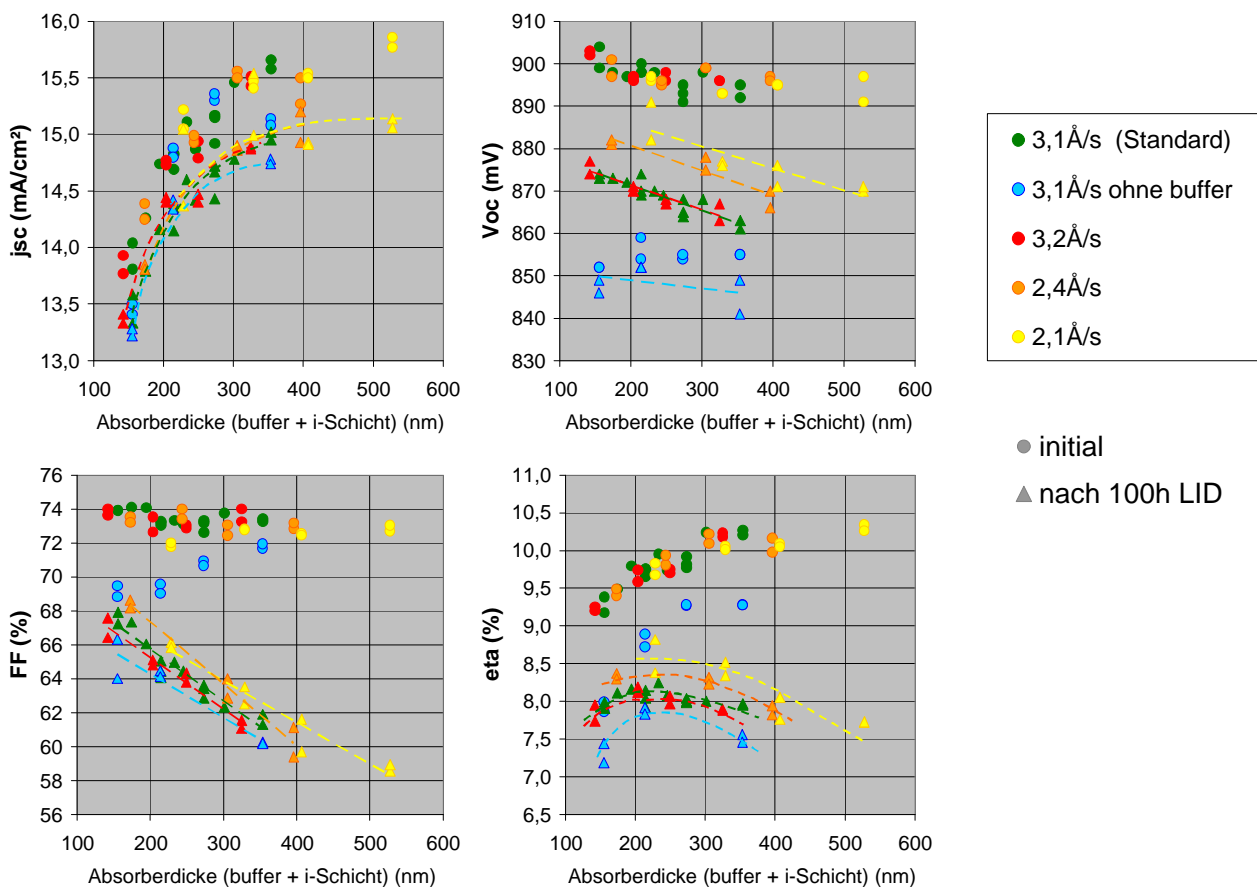


Abb. 2.9 Elektrische Daten von amorphen pin-Zellen initial und nach 100 h Lichtalterung in Abhängigkeit von der Absorberdicke. Die i-Schicht wurde mit unterschiedlich Raten abgeschieden, in einer Serie wurde kein Buffer verwendet

Zu jeder Abscheiderate wurde eine Reihe von Zellen mit unterschiedlicher Schichtdicke hergestellt. Auf diese Weise erhält man eine Aussage über das Alterungsverhalten in Abhängigkeit von der Schichtdicke, zudem lassen sich generelle Trends oder auch Ausreißer leichter erkennen. In Abb. 2.9 sind die elektrischen Zelldaten jeweils initial und nach 100 h Lichtalterung dargestellt. Die Kurzschlussstromdichte steigt erwartungsgemäß mit zunehmender Absorberdicke an, ein Unterschied zwischen den einzelnen Abscheideraten ist nicht erkennbar. Auch die V_{oc} -Werte liegen für die verschiedenen Abscheideraten initial auf dem gleichen Niveau. Bereits nach 100 h Lichtalterung spalten

diese Ergebnisse aber signifikant auf. Bei Zellen mit vergleichbarer Dicke weisen diejenigen mit niedriger Abscheiderate ein um 10 bis 15 mV höheres V_{oc} auf. Auch im Füllfaktor ist nach 100 h Lichtalterung ein leichter Vorteil für Zellen mit niedriger Rate erkennbar. Der erwartungsgemäß steigende Verlust im FF mit steigender Absorberdicke führt in Kombination mit der gleichzeitig steigenden Kurzschlussstromdichte zur Ausbildung eines Optimums im Wirkungsgrad nach Lichtalterung etwa bei 220nm Absorberdicke. Aufgrund der guten Werte im FF und V_{oc} lässt sich im Wirkungsgrad ein deutlicher Vorteil für die Zellen mit niedriger Abscheiderate erkennen.

2.2 Dunkelalterung von mikrokristallinen Siliziumzellen

Während die auf den Staebler-Wronski-Effekt zurückgehende Lichtalterung von amorphem Silizium bei Solarzellen aus mikrokristallinem Silizium allenfalls eine geringe Rolle spielt, hat sich gezeigt, dass elektrische Instabilitäten auch an Zellen aus $\mu\text{-Si}$ Material auftreten können. Dabei können an unverkapselten Zellen bereits nach Lagern bei Raumbedingungen und im Dunkeln deutliche Verluste im Wirkungsgrad auftreten.

Im Zuge dieser Dunkelalterung leiden Leerlaufspannung und Füllfaktor am deutlichsten, wohingegen im Strom geringere und uneinheitliche Veränderungen beobachtet werden. Der grundsätzliche Effekt, der sich in Form von Transienten der Dunkelleitfähigkeit und der Defektkonzentration äußert, ist als Postoxidation von mikrokristallinem Silizium schon länger bekannt^[1,2,3]. Es wurde aber bisher davon ausgegangen, dass die $i\text{-}\mu\text{-Si}$ -Schicht einer Solarzelle durch die Barrierewirkung von amorpher n -Schicht und Rückkontakt geschützt und damit der Effekt in Zellen keine große Rolle spielen sollte. Erst jüngere Veröffentlichungen, unter anderem angestoßen durch dieses Forschungsprojekt, widmen sich vermehrt den Fragen der Stabilität unter Dunkellagerung.

In der Folge wird instabiles mikrokristallines Silizium ($\mu\text{-Si}$) als Typ-I- und stabiles als Typ-II-Material bezeichnet.

¹ S. Vepřek, Z. Iqbal, R.O. Kühne, P. Capezzuto, F.-A. Sarott, J.K. Gimzewski, J. Phys. C, 16, 2641 (1983)

² F. Finger, R. Carius, T. Dylla, S. Klein, S. Okur, M. Günes, IEE Proc.-Circuits Devices Syst. 150, 300 (2003)

³ T. Dylla, F. Finger, R. Carius, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 762, A2.5.1 (2004)

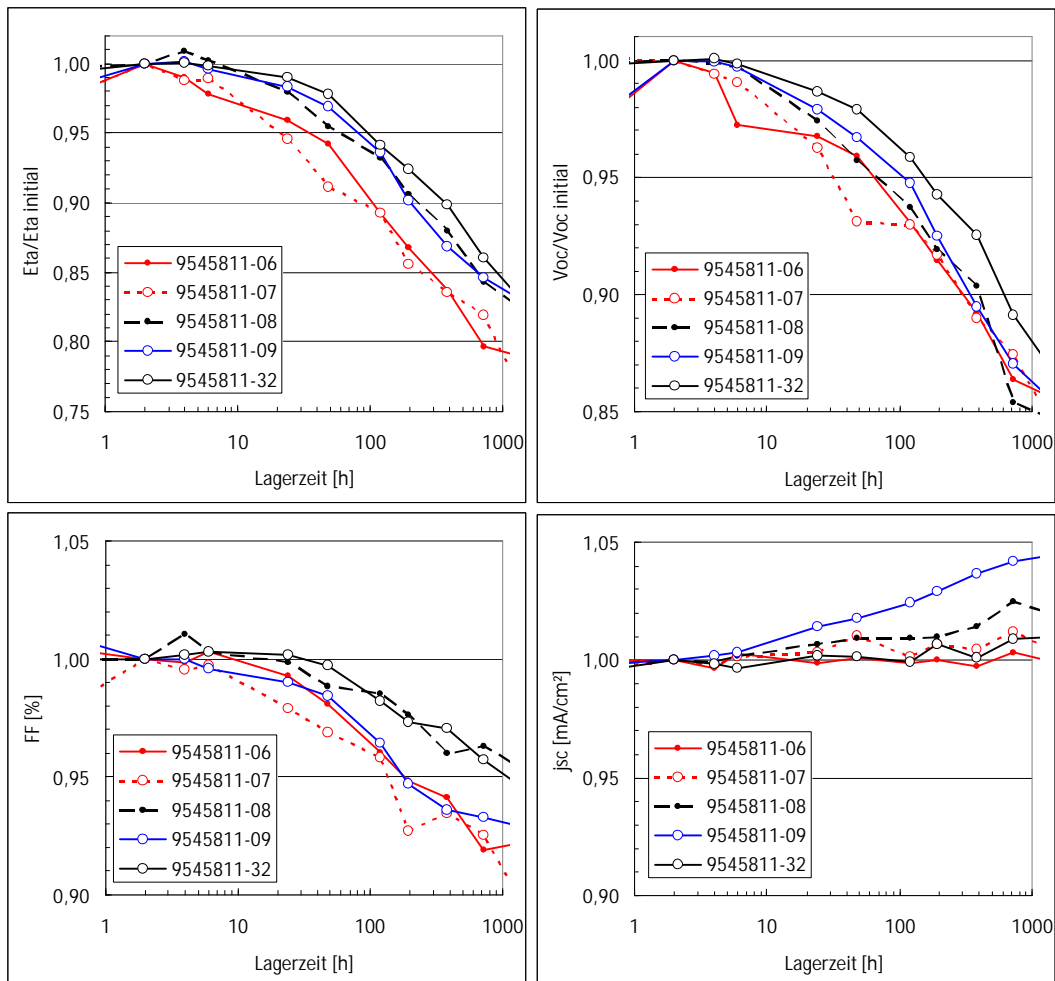


Abb. 2.10 Elektrische Verluste von mikromorphen Tandemzellen aus Typ-I-Material während der Lagerung über fast 1000 Stunden im Dunkeln

Die phänomenologischen Folgen der Dunkelalterung sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Bereits etwa einen Tag nach dem Tempern der Typ-I-Material Solarzellen zeigt sich die beginnende Degradation von Spannung und Füllfaktor, die nach einigen Wochen einen Rückgang von 10 bis 20 % erreicht.

Ein zweites wichtiges Phänomen im Zusammenhang mit der elektrischen Instabilität von $\mu\text{-Si}$ besteht darin, dass die Degradation annähernd vollständig reversibel ist. Werden die Zellen getempert, wie allgemein vor der Charakterisierung von mikromorphen Zellen üblich, erholen sich die Werte von Spannung und Füllfaktor wieder auf das Niveau der ersten Messung.

Durch die enge Kooperation mit der Charakterisierungs- und Analytikabteilung von der SCHOTT AG in Mainz wurde unter anderem eine sehr prägnante und eindeutige Analyseverfahren entwickelt, die in der Lage ist, die Unterschiede zwischen Typ-I und Typ-II $\mu\text{-Si}$ quantitativ messbar zu machen (siehe detailliert in Kap. 3.2). Dazu wurden Zellen in schwerem Wasser (D_2O) bzw. in einer Atmosphäre aus D_2O -Dampf bei etwa 50°C gelagert, bevor das Eindiffusionsprofil des Deuteriums mittels Time-of-Flight Sekundärelektronen-massenspektrometrie (TOF-SIMS) gemessen wurde. Dieses Verfahren erlaubt den eindeutigen Nachweis der Eindiffusion von atmosphärischen Bestandteilen, da es als isotopenselektive Methode einen hohen Kontrast der zu detektierenden Spezies herstellt. Während in SIMS-Messungen zwar tendenziell, aber eben nicht eindeutig, eine Zunahme der Konzentration von Sauerstoff in instabilen Zellen

gefunden wurde, konnte erst durch den Nachweis von Deuterium nach Exposition in schwerem Wasser eine zuverlässige Unterscheidung von stabilem und instabilem Material erfolgen, die sich mit den Ergebnissen elektrischer Messungen deckt.

In Abbildung 2.11 ist der Unterschied in den Diffusionsprofilen von Typ-I- und Typ-II-Material gezeigt. Ein relativ hohes Signal von Deuterium lässt sich in Typ-I-Material nachweisen, wo es ein deutliches Profil einer Eindiffusion ausbildet. Im stabilen Typ-II-Material ist die Konzentration von D zwei Größenordnungen niedriger und das D-Signal fällt nach wenigen hundert Nanometern unter die Nachweisgrenze. Überraschend ist diese Beobachtung insofern, da auf elektronenmikroskopischen Bruchkantenaufnahmen auch in Typ-II-Material Microcracks gefunden werden, wenn auch vielleicht in etwas geringerem Ausmaß.

Mit derselben Methode kann auch ein leichter Rückgang der Deuteriumkonzentration in der Zelle nach einer üblichen Temperbehandlung nachgewiesen werden. Wie der rechte Graph in Abbildung 2.11 zeigt, nimmt das D-Signal um einen Faktor zwei ab, nachdem die Zelle getempert wurde. Dieser Effekt spricht für eine partielle Anlagerung von Wasser/D₂O an innere Oberflächen im porösen Material. Angesichts der starken Polarität der Wassermoleküle ist eine solche Anlagerung bei nicht zu hohen Temperaturen plausibel. Da diese oberflächliche Dipolschicht eine starke Bandverbiegung im Halbleiter bedingt, würden sich so die beobachteten reversiblen elektrischen Verluste erklären. Hinzu kommen noch irreversible Veränderungen im Material durch die fortschreitende Oxidation von Typ I-Material, die in SIMS Messungen bestätigt wurden. Mittlerweile konnte durch diese Untersuchungen ein relativ geschlossenes Bild der Dunkeldegradation gezeichnet werden, wenn auch die genauen mikroskopischen Wirkungsweisen der Dunkeldegradation von $\mu\text{-Si}$ nicht restlos geklärt sind. Insbesondere das Stabilitätsverhalten von Typ I-Material wird durch die Wahl des Substrats und die Eigenschaften der dotierten Schichten zusätzlich beeinflusst. Die genaue Rolle der unbestritten vorhandenen Mikrorisse im Material lässt sich schwer bewerten, da eine exakte Quantifizierung mit den gegebenen Analyseverfahren nicht möglich war. Ihr Auftreten wird aber zum Beispiel durch die Verwendung von TCO Substraten mit steilen Flankenwinkeln besonders begünstigt.

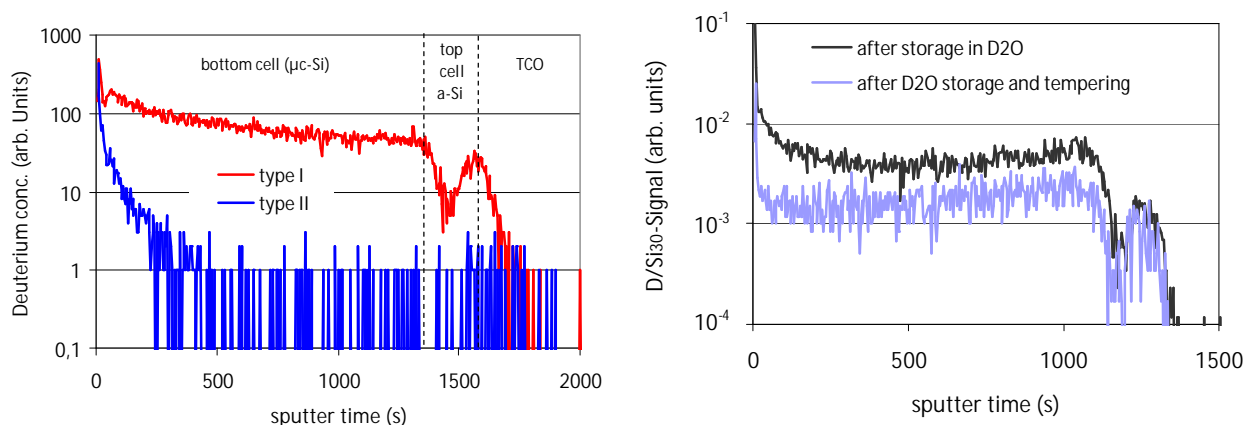


Abb. 2.11 Diffusionsprofile von schwerem Wasser anhand des Deuteriumsignals in Zellen, die ohne Rückkontakt sieben Wochen lang in D₂O gelagert wurden (Bild links). Typ-I-Material zeigt eine um gut zwei Größenordnungen höhere D-Konzentration als Typ-II-Material. Durch Tempern der Zellen vom Materialtyp-I wird die D-Konzentration verringert, was auf angelagertes D₂O hindeuten kann (Bild rechts)

Da die elektrische Instabilität des Typ-I $\mu\text{-Si}$ mit der Eindiffusion von Wasserdampf und Sauerstoff verbunden ist, stellt sich die Frage, ob durch entsprechende Wahl nachfolgender barriereartiger Schichten Stabilität bzw. stark verlangsamte Degradation erreicht werden kann. Obwohl aber die amorphe Si-n-Schicht und der metallische Rückkontakt für sich bereits gute Diffusionsbarrieren darstellen, können sie auf der rauen Morphologie der mikromorphen Zellen offensichtlich nicht sicher stellen, dass sämtliche Mikrorisse an der Oberfläche abgedeckt werden. Versuche mit dickeren amorphen Dotierschichten führten zu hohen Stromeinbußen, was sich durch dotierte Schichten aus Siliziumsuboxid SiO_x vermeiden lässt. Im Hinblick auf die Anwendung in langzeitstabilen Photovoltaikmodulen sind aber solche „cap-layer“-Ansätze insgesamt sehr kritisch zu sehen.

Beispielhaft dafür stehen die Erkenntnisse zum Diffusionsverhalten von Proben mit dickem TCO-Rückkontakt. Obwohl hier eine 1 bis 2 μm dicke TCO-Schicht aufgebracht wurde, zeigen sich im Lauf der Zeit auch hier elektrische Verluste. Die Eindiffusion von Wasser erfolgt zwar deutlich verlangsamt, dennoch bildet sich nach einiger Zeit doch ein typisches Eindiffusionsprofil aus, d.h. Wasser dringt also doch durch die TCO-Barriere in das darunterliegende $\mu\text{-Si}$ Material ein. In welchem Ausmaß und auf welcher Zeitskala solche Effekte in verkapselten Modulen auftreten, kann man ohne die entsprechenden Langzeitbelastungstests nicht verlässlich abschätzen.

Es lassen sich auch Hinweise finden, dass die p-Schicht der Bottomzelle das Stabilitätsverhalten beeinflusst. So wurde etwa beim Verkapseln von mikromorphen Modulen ein charakteristischer Spannungsverlust von ca. 80 mV beobachtet, wenn die Absorberschicht der Bottomzelle aus Typ I-Material besteht. Durch Modifikation der p-Schicht alleine ließ sich dieser Effekt um die Hälfte reduzieren, ohne dass sich die grundlegende Instabilität der Absorberschicht dadurch umgehen ließ. In der Literatur finden sich außerdem Studien zu speziellen p-Schichten aus dotiertem SiO_x , die in den Zellen zu erheblich verbesserter Toleranz gegenüber den schädlichen Auswirkungen rauer TCO-Substrate auf die elektrischen Kenndaten führen.

Durch die Verkapselung selber lassen sich nach gegenwärtigem Kenntnisstand die Dunkelalterungsverluste von Typ-I-Material nicht unterbinden. Abhängig vom Polymer, das für die Verkapselung der Module verwendet wird, erfolgen die bekannten elektrischen Verluste lediglich zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Können bei EVA bereits während des Laminierschrittes mit der verbundenen Nachvernetzung starke Verluste in Spannung und Füllfaktor auftreten, beobachtet man bei alternativem Verkapselungsmaterial erst einige Zeit nach der Verkapselung eine schleichende Instabilität, wobei nach einem Zeitraum von einigen Wochen bis wenigen Monaten in beiden Fällen ein vergleichbares Niveau festgestellt wird. Die Alterung kommt aber danach nicht zum Erliegen, sondern schreitet verlangsamt auch nach über einem Jahr noch fort. Diese Beobachtungen zeigen, dass Polymere aufgrund ihrer Permeabilität und Aufnahmefähigkeit für atmosphärische Gase nur verzögernde Wirkung auf die Dunkelalterung ausüben können.

Zusammenfassend kann man als wichtigste Voraussetzung für stabiles $\mu\text{-Si}$ Material nach gegenwärtigem Kenntnisstand das Depositionsregime der intrinsischen Schicht identifizieren. Je nachdem, ob letztere durch poröses und damit oxidationsanfälliges Typ-I-Material oder durch ein kompaktes, dichtes Typ-II-Material gebildet wird, verhält sich die Zelle entsprechend stabil bzw. instabil.

2.3 Einfluss des Depositionsregimes auf die Stabilität

Da sich in den oben beschriebenen Versuchen gezeigt hat, dass sich die Qualität des i-Schichtmaterials vom Typ-I und Typ-II deutlich unterscheidet, wurde im Folgenden

versucht, unterschiedliche Depositionsregime im Hinblick auf die elektrische Stabilität des $\mu\text{-Si}$ -Materials zu klassifizieren. Zellen, die den in Abschnitt 1.1 und 1.2 genannten Depositionsregimen entstammen, wurden deshalb elektrisch nachgemessen, und die Ergebnisse wurden mit den initialen Werten verglichen.

Ohne hier alle detaillierten Einzelergebnisse wiederzugeben, lässt sich feststellen, dass sich lagerungsstabiles $\mu\text{-Si}$ Typ-II-Material bevorzugt bei hohem Druck herstellen lässt. Diese generelle Aussage lässt sich mit Abb. 2.12 anschaulich illustrieren. Hier ist der relative Leistungsrückgang von optimierten Bottomzellen aus unterschiedlichen Druckbereichen gegen den Druck aufgetragen. Wie deutlich zu erkennen ist, sind die mikrokristallinen Bottomzellen umso stabiler, je höher der Druck während der Abscheidung war. Da in diesem Regime trotz hoher Depositionsrate eine Zellqualität auf sehr hohem Niveau erreicht werden kann, sollte in Zukunft die Optimierung von industriellen Depositionsanlagen vorangetrieben werden, die sich für die großflächige Deposition bei hohem Druck und hoher Rate eignen.

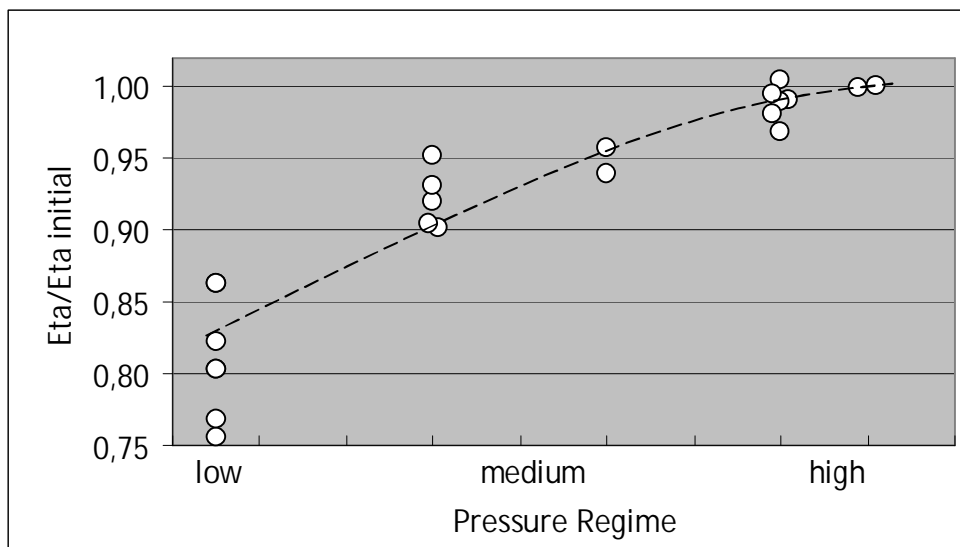


Abb. 2.12 Relative Wirkungsgradverluste von Bottomzellen als Funktion des Depositionsdruckes

2.4 Lichtalterung von Tandemzellen

Zur zweifelsfreien Beurteilung der Lichtalterung von mikromorphen Tandemzellen sollte sichergestellt werden, dass keine Dunkelalterungseffekte überlagert sind. Deshalb wurden für eine Schichtdickenserie zur Lichtalterung Zellen auf Basis von Typ-II-Material verwendet.

Die Dicke der Topzelle wurde zwischen 220 nm und 365 nm variiert, während Bottomzellendicken von 1,4 μm und 2,0 μm verwendet wurden (blaue bzw. rote Symbole in Abb. 2.13).

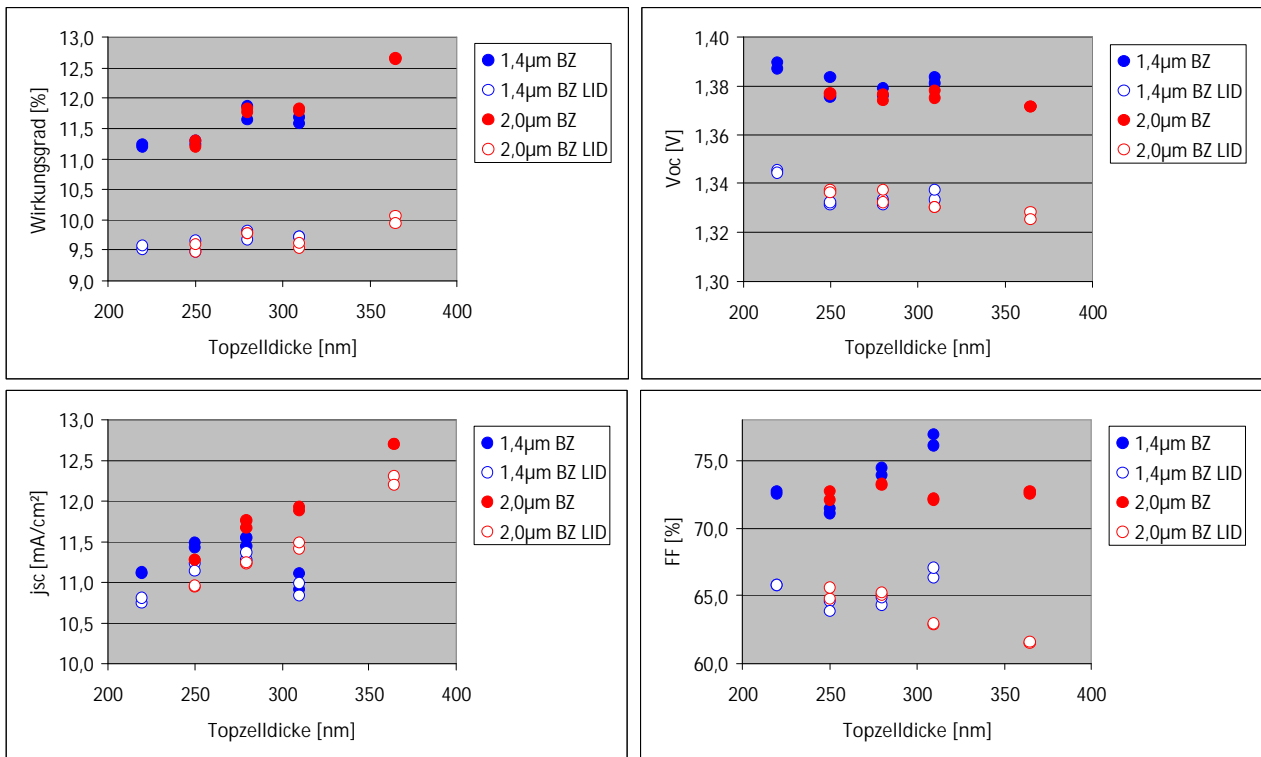


Abb. 2.13 Lichtalterung einer Schichtdickenserie mit Variation der Topzellendicke für zwei verschiedene Bottomzellendicken, Wirkungsgrad, Voc, jsc und FF initial und nach 1000 h Dauerbeleuchtung

Quanteneffizienzmessungen (hier nicht dargestellt) zeigten, dass die Tandemzellen mit einer Bottomzelldicke von 1,4 μm initial gutes Strom-Matching zeigen, wenn die Topzelle ca. 250 nm dick ist. Nach der Lichtalterung für 1000 h hat sich dieser Punkt hin zu einer Topzellendicke von ca. 275 nm verschoben. Der beste stabilisierte Wirkungsgrad liegt für diese Dickenkombination bei 9,8 %. Mit einem initialen Wirkungsgrad von 11,86 % ergibt sich eine prozentuale Alterung von 17,2 %.

Wie Abbildung 2.13 zeigt, nimmt der Strom annähernd linear mit der Topzelldicke zu. Während die dünneren Bottomzellen zu einer Stromabnahme jenseits des Matchingpunktes führen, hält die Stromzunahme für dickere Bottomzellen im untersuchten Bereich weiter an. Die Proben mit einer Topzellendicke von 365 nm und einer Bottomzellendicke von 2,0 μm ragen aus diesem Trend heraus, da sie zusätzlich mit einer Antireflexbeschichtung auf dem Substratglas versehen wurden, um den Summenstrom um 3-4 % zu erhöhen. Diese Zellen erreichen auch den höchsten initialen Wirkungsgrad von 12,7 %. Im initialen Zustand sind die Zellen mit dieser Schichtdickenkombination

annähernd gematcht. Aufgrund der großen Topzelldicke zeigen diese Zellen aber eine erhöhte relative Alterung von 20,4 %. Nach 1000 h LID stabilisiert die Effizienz bei 10,1 %. Damit stellen sie die Zellen mit dem höchsten stabilen Wirkungsgrad innerhalb der Serie dar. Allerdings beträgt der Unterschied zu dem besten stabilen Wert mit 1,4 µm Bottomzelle nur 0,25 % absolut. Dafür muss eine um 43 % längere Abscheidedauer für die Bottomzelle in Kauf genommen werden, sicherlich eine wirtschaftliche Herausforderung für eine industrielle Produktion.

Die initiale Spannung der Tandemzellen nimmt mit Erhöhung der Topzelldicke im beobachteten Intervall um 10 bis 20 mV ab, wie Abb. 2.13 zeigt. Bei den 2 µm dicken Bottomzellen kommt es zu zusätzlichen 10 mV Spannungsverlust.

Der initiale Füllfaktor ist im Falle der 1,4 µm dicken Bottomzellen von der Matchingsituation beeinflusst, bei den dickeren Bottomzellen zeigt er keinen eindeutigen Trend. Nach 1000 h Lichtalterung wird die starke Abnahme des Füllfaktors mit der Topzelldicke besonders für die Zellen mit Toplimitierung deutlich. Die Stromdichte nimmt als Funktion der Topzelldicke auch nach der Lichtalterung zu. Quantitativ verschieben sich die initialen Werte um 0,3 bis 0,5 mA/cm² nach unten.

Das relative Maß der Wirkungsgradverluste nach der Lichtalterung ist in Abb. 2.14 dargestellt. Nahezu unbeeinflusst von der Bottomzelldicke nimmt LID nahezu linear mit der Topzelldicke zu. Positive Abweichungen von diesem Trend, der durch die gestrichelte Linie in Abb. 2.14 verdeutlicht wird, finden sich für Zellen mit 310nm/1,4µm Top- bzw Bottomzelldicke, wobei diese Kombination bereits eine leichte Bottomlimitierung darstellt. Aus dem gleichen Grund erscheinen die Zellen mit 365 nm Topzelle und 2,0 µm Bottomzelle geringfügig stabiler.

Es bleibt festzustellen, dass die Lichtalterung der mikromorphen Tandemzelle mit 15 bis 21 % relativ hoch liegt. Eine geringere LID könnte über dünnere Topzellen (200nm oder weniger) erreicht werden. Voraussetzung dafür ist aber der Einsatz noch besserer licht-einkoppelder bzw. licht-streuender Konzepte in Kombination mit Zwischenreflektoren. Eine weitere notwendige Verbesserung des Material der amorphen Topzelle wurde schon in 2.1 diskutiert. Eine Kombination beider Ansätze ist vielversprechend, Zusätzlich kann die Verwendung leicht „bottomlimitierter“ Tandemzellen beitragen, wie die Daten für Topzellen mit 310 nm Dicke zeigen: durch leichte spektrale Fehlanpassung lässt sich die Lichtalterung um 3 bis 4 % verringern. Die Limitierung der Bottomzelle sollte hierzu möglichst nur so groß sein, dass nach der Lichtalterung gerade noch keine Limitierung durch die Topzelle vorliegt. Stärkere Limitierung verkürzt zwar die Abscheidedauer, reduziert aber gleichzeitig bereits den initialen Wirkungsgrad der Tandemzelle.

Tab. 2.1 zeigt die Daten der besten Schichtdickenkombinationen jeweils vor und nach der Lichtalterung.

275 nm Topzelle – 1,4 µm Bottomzelle				365 nm Topzelle – 2,0 µm Bottomzelle			
Zellparameter	initial	nach 1000h	Verlust	Zellparameter	initial	nach 1000h	Verlust
j _{sc} [mA/cm ²]	11,55	11,37	-1,5%	j _{sc} [mA/cm ²]	12,69	12,30	-3,1%
V _{oc} [mA/cm ²]	1,379	1,333	-3,3%	V _{oc} [mA/cm ²]	1,371	1,328	-3,2%
FF [mA/cm ²]	74,4	64,8	-12,9%	FF [mA/cm ²]	72,7	61,5	-15,2%
Eta [%]	11,86	9,82	-17,2%	Eta [%]	12,65	10,05	-20,4%

Tab. 2.1 Vergleich der besten Zellen (Mittelwerte) aus der Schichtdickenvariation vor und nach der Lichtalterung

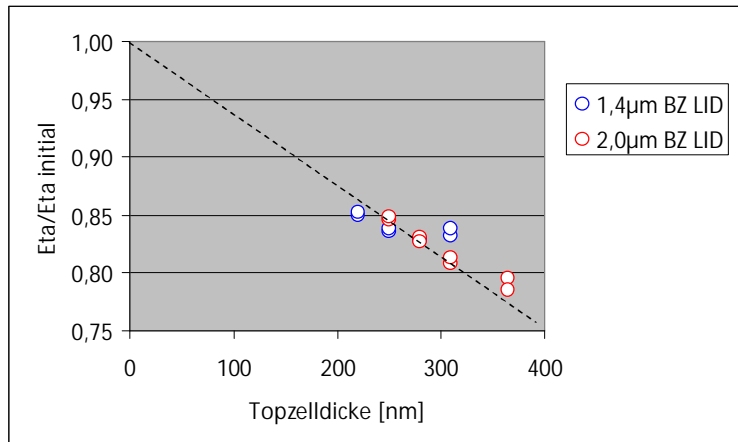


Abb. 2.14 Relativer Wirkungsgradverlust nach 1000 h Lichtalterung als Funktion der Topzellendicke

2.5 Rekordzellen und -module

Die im Projektzeitraum hergestellte mikromorphe „Champion-Zelle“ hatten einen Schichtaufbau mit 365nm dicker Topzelle und 2,0 μm dicker Bottomzelle. Das Substratglas war von Asahi und der Rückkontakt war auf Basis von ZnO/Ag. Zusätzlich fand eine Frontglasentspiegelung statt mittels Abscheidung einer Antireflexschicht bei SCHOTT AG. Dadurch wird eine zusätzliche Verbesserung des Kurzschlussstroms um etwa 3 bis 4 % erzielt.

Im Initialzustand wurde so ein **Wirkungsgrad von etwa 12,9 bis 13,0 % erreicht**, bei sehr hohen Werten von Spannung und Füllfaktor, sodass sich die Stromgewinne in der Effizienz widerspiegeln. Der am Wacom-Sonnensimulator beim Wirkungsgrad von 12,85 % gemessene Kurzschlussstrom liegt mit 12,68 mA/cm^2 sogar leicht unter dem aus der Quantenausbeute bestimmte Kurzschlussstromdichte von 12,76 bzw. 12,95 mA/cm^2 für Top- bzw. Bottomzelle. Nimmt man den Stromwert der Topzelle unter der Annahme der strengen Limitierung erhält man 12,93 % Wirkungsgrad, legt man dagegen den Mittelwert aus Top- und Bottomzellenstromdichte mit 12,85 mA/cm^2 zu Grunde so erhält man einen Wirkungsgrad von 13,03 % (Tab. 2.2).

Nach 1000 h Lichtalterung erreichte die beste Zelle noch 10,3% aufgrund von Verlusten in Strom und Füllfaktor und Füllfaktors.

	j_{sc} [mA/cm^2]	V_{oc} [V]	FF [%]	Eta initial [%]
Champion (Wacom)	12,68	1,378	73,56	12,85
Champion (QE-Strom limitierend)	12,76	1,378	73,56	12,93
Champion (QE-Strom Mittel Top/Bottom)	12,85	1,378	73,56	13,03

Tab. 2.2 13 %-Champion-Zelle, die im Rahmen des Vorhabens realisiert wurden. Es wurden Kurzschlussströme aus der Sonnensimulatormessung bzw. aus der Quantenausbeute zu Grund gelegt

	P [W]	j _{sc} [mA/cm ²]	V _{oc} [V]	FF [%]	Eta (active area) [%]
Bestes Minimodul initial	0,285	11,1	1,43	70,9	11,2
Bestes Modul 1,4m² initial	143,6	11,19	1,389	69,52	10,8
Bestes Modul 1,4m² nach outdoor LID	122,6	11,0	1,305	64,7	9,3

Tab. 2.3 Einzeldaten der besten mikromorphen Module aus dem Projekt

Auf einer Substratgröße von 1,4 m² erreichte das beste Modul eine initiale Leistung von 143,6 W, was einem **active area Wirkungsgrad von 10,8 %** entspricht. Ein ähnliches Modul, das bereits eine Outdoor-Vorstabilisierung hinter sich hat, zeigte immer noch eine Leistung von 123 W, also **9,3 % stabilen Wirkungsgrad** (Tab. 2.3).

2.6 Metrologie mit idealer Komponenten-Referenzzelle

Für Dünnschichtsolarzellen und -module werden bei der Leistungsmessung am Sonnensimulator als Referenzzellen häufig mittels Farbglas spektral gefilterte kristalline Solarzellen verwendet. Das Farbglasfilter hat die Aufgabe, die spektrale Empfindlichkeit oder Quanteneffizienz der Referenzzelle möglichst an die Quanteneffizienz der zu prüfenden Dünnschichtsolarzelle anzupassen, was aber auf Grund der beschränkten Auswahl von Farbglasfiltern nur unzureichend gelingt. Somit verbleibt eine spektrale Fehlanpassung zwischen Prüfling und Referenzzelle, die eine aufwendige Korrektur der Kenngrößen des Prüflings mit Hilfe des spektralen Fehlanpassungsfaktors (Miss Match Factor, MMF) erfordert. Dieser berechnet sich nach der Norm IEC 60904-7 folgendermaßen:

$$MMF = \frac{\int SR_{DUT}(\lambda) \cdot E_{STC}(\lambda) d\lambda \int SR_{REF}(\lambda) \cdot E_{IN}(\lambda) d\lambda}{\int SR_{REF}(\lambda) \cdot E_{STC}(\lambda) d\lambda \int SR_{DUT}(\lambda) \cdot E_{IN}(\lambda) d\lambda} \quad (2.1)$$

Wie in der IEC 60904-3 angegeben, ist E_{STC} als spektrale Verteilung der solaren Referenzbestrahlungsstärke, E_{IN} als spektrale Bestrahlungsstärkenverteilung des einfallenden Lichts bei der Messung, sowie SR_{REF} als spektrale Empfindlichkeit der Referenzzelle und SR_{DUT} als jene des Prüflings (Device Under Test, DUT) definiert.

Abb. 2.15 zeigt die qualitativ große spektrale Fehlanpassung für KG3- und OG590-Farbglas gefilterte c-Si Zellen, welche typischerweise als Referenzzellen für a-Si Top- und µc-Si Bottomzellen von a-Si/µc-Si Tandemzellen eingesetzt werden.

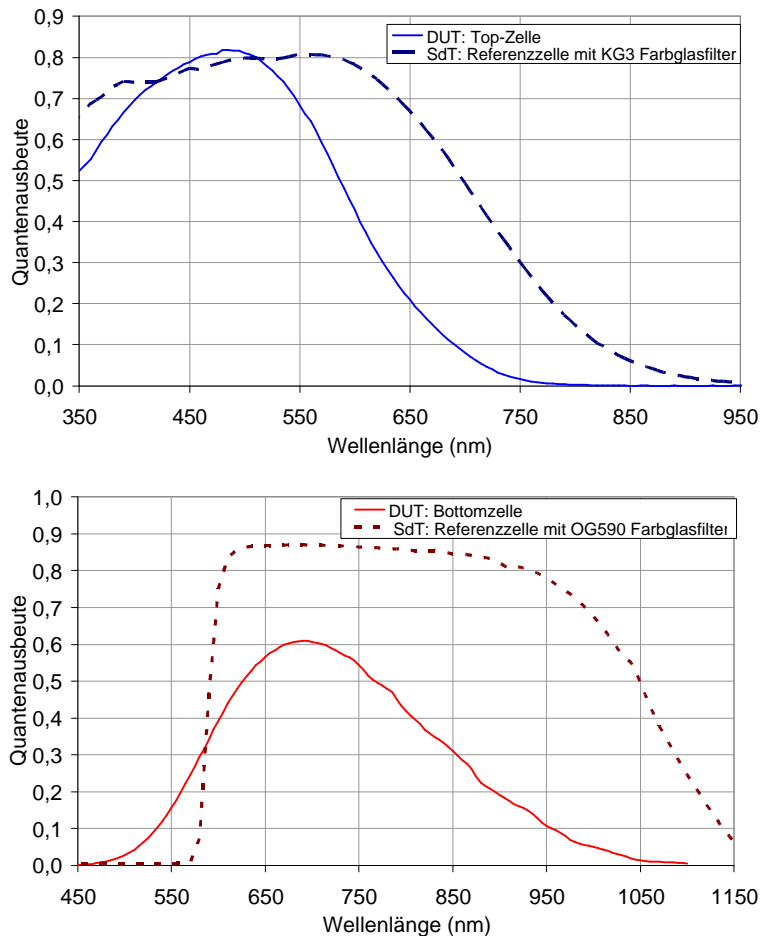


Abb. 2.15 Spektrale Fehlanpassung farbglasgefilterter c-Si Referenzzellen für a-Si/ μ c-Si Topzelle (links) u. Bottomzelle (rechts)

Mit Hilfe des spektralen Fehlanpassungsfaktors nach Gleichung (2.1) ist es möglich, wenn auch mit erheblichem Aufwand, einen Sonnensimulator für Einfachzellen (Single-junction) zu kalibrieren und die Kenngrößen, insbesondere Strom und Leistung mit einer hinreichenden Genauigkeit zu prüfen.

Die elektrische Vermessung einer Mehrfachzelle ist jedoch wesentlich schwieriger als die einer Single-junction Zelle, da, weil ein elektrischer Zugriff auf die Teilzellen bisher nicht möglich ist, man immer nur die Mehrfachzelle über zwei Anschlüsse als eine elektrische und optische Einheit messen kann.

Zwar ist in der IEC 60904-7 angegeben, dass die Gleichung für den spektralen Fehlanpassungsfaktor auch auf Mehrfachsolarzellen angewendet werden kann. Tatsächlich ist eine solche Fehlanpassung bei Mehrfachsolarzellen praktisch kaum durchführbar. Der Kalibriervorgang nach der in IEC 60904-7 beschriebenen Methode gestaltet sich dabei nämlich als langwieriger, weil iterativer Prozess. Bei dem für die Prüfung eingesetzten Sonnensimulatoren mit Mehrfach-Lichtquellen wird dabei die Bestrahlungsintensität einer jeden Teil-Lichtquelle und damit das Gesamtspektrum verändert, gefolgt von einer erneuten Messungen der spektralen Verteilung und anschließender Neuberechnungen des MMF, solange bis eine ausreichend geringe Abweichung des MMF erreicht wird.

Ein weiterer Nachteil bei der gängigen Methode ist, dass die Farbglas-gefilterte kristalline Referenzsolarzelle typischerweise nur wenigen Quadratzentimeter groß ist. Großflächige Sonnensimulatoren lassen sich auf Grund örtlicher Spektral- und Intensitäts-Inhomogenitäten wiederum nur unter erheblichem Mess- und Zeitaufwand mit diesen kleinflächigen Referenzzellen kalibrieren. Dieser Aufwand ist insbesondere in der Produktionskontrolle von photovoltaischen Dünnschichtmodulen nicht leistbar.

Eine weitere, zurzeit unüberwindbare Schwierigkeit stellt das genaue Vermessen der spektralen Verteilung von gepulsten Solarsimulatoren (Flashern) dar, wie sie üblicherweise für die Prüfung großflächiger Module in der Produktion eingesetzt werden. Zuverlässige Messungen der spektralen Verteilung sind selbst durch renommierte Institute nicht verfügbar. Dadurch ist eine hinreichend genau Kalibrierung der Einstrahlung eines Flashers auf besser als 1 % mit der Methode der spektralen Fehlanpassung nach DIN 60904-7 für sowohl Single- als auch Multi-junction Dünnschichtmodule nicht möglich.

Infolge dessen sind zertifizierte Referenzmodule auf Basis einer a-Si/ μ c-Si-Tandemzelle gegenwärtig nicht erhältlich. Bisherige Veröffentlichungen von Vergleichsmessungen renommierter Institute wie ISE, TISO, NREL und TÜV Rheinland mit Dünnschichtsolarzellen, insbesondere mit a-Si/ μ c-Si double-junction Solarzellen und Modulen ergaben inakzeptable Leistungsabweichungen von bis zu ± 8 %.

Um dennoch eine zertifizierte Kalibrierung gepulster Solarsimulatoren mit hoher Genauigkeit für die Prüfung der Kenngrößen von Multi-junction Dünnschichtmodulen durchführen zu können, wurde eine neue Methode entwickelt. Diese kann im Folgenden jedoch noch nicht detailliert beschrieben werden.

Abb. 2.16 zeigt als Ergebnis die Quanteneffizienzen von neu entwickelten Komponentenzellen, die einmal die Topzelle, sowie zum Anderen die μ c-Si Bottomzelle spektral nahezu perfekt nachbilden. Zu beobachtende Abweichungen sind nachweislich gering und bleiben im Rahmen der üblichen Reproduzierbarkeit bei der Zellherstellung und der Messgenauigkeit der Quanteneffizienz.

Mit dieser Methode hergestellten a-Si und μ c-Si Single-junction Komponentenzellen eignen sich aufgrund ihrer nahezu idealen Anpassung der spektralen Empfindlichkeit an die einer a-Si Top- bzw. μ c-Si Bottomzelle als Referenzzellen zur Kalibrierung von spektral variierbaren, gepulsten oder kontinuierlichen Sonnensimulatoren für a-Si/ μ c-Si Tandemzellen, da der spektrale Fehlanpassungsfaktor nach Gleichung (2.1) sich mit $QE_{DUT} \sim QE_{REF}$ für beliebige spektrale Verteilungen praktisch zu eins ergibt und somit nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Damit können Sonnensimulatoren mit Spektren eingesetzt werden, die nicht zwingend Klasse A oder besser nach IEC 60904-3 erfüllen müssen. Es ist lediglich Voraussetzung, dass sie spektral und in ihrer Intensität variierbar sind. Somit sinken die an den Sonnensimulator gestellten Anforderungen hinsichtlich bestmöglicher spektraler Anpassung an das solare Referenzspektrum der IEC 60904-3 erheblich. Nicht spektral variierbare Simulatoren können mit Hilfe der Komponentenzellen hinsichtlich ihrer Eignung als Solarsimulator oder ihrer Messgenauigkeit, über die gemessenen Beleuchtungsintensitäten auf Top- und Bottomzelle, schnell und effizient beurteilt werden.

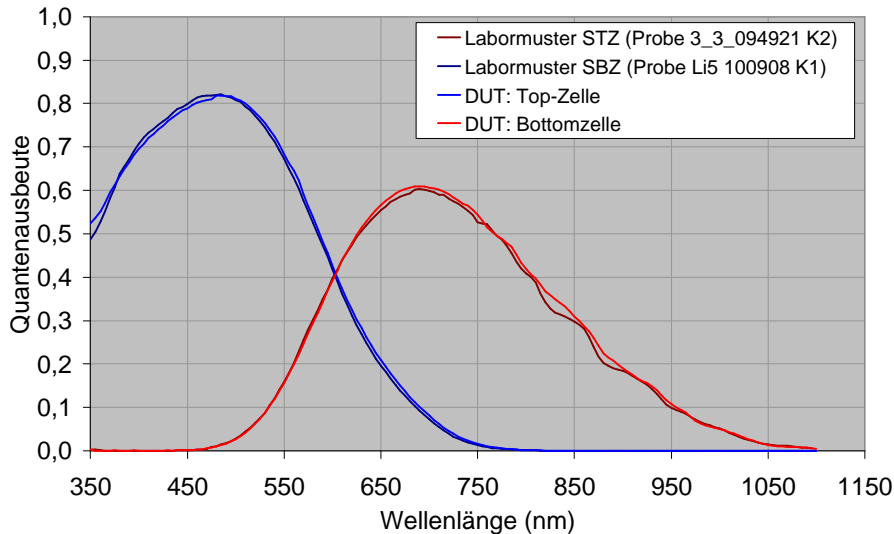


Abb. 2.16 Spektrale Empfindlichkeiten von Komponentenzellen „Labormuster“, verglichen Top- und Bottomzelle einer a-Si/ μ c-Si Tandemzelle

Referenzsolarelemente müssen nach IEC 60904-2 bestimmte Eigenschaften besitzen. Um den darin gestellten Anforderung soweit wie möglich gerecht werden zu können befindet sich eine Verkapselung der Komponentenzellen in Zusammenarbeit mit Fa. Czibula & Grundmann in Berlin in Entwicklung. Als Ausgangsbasis dient hierfür die Standard-Verkapselung von kristallinen Solarzellen wie sie Czibula & Grundmann für das Fraunhofer ISE durchführt. Ein wesentlicher Unterschied ist hierbei jedoch, dass kein Schutzfenster benötigt wird da die Zellen auf Superstrat-Technologie beruhen. Interne Reflexionen zwischen Schutzglas und Zellen sind dadurch, anderes als bei c-Si Zellen, ausgeschlossen. Um eine gute thermische Anbindung der Zelle an das Referenzgehäuse zu gewährleisten befindet sich unter dem gesamten Substrat eine Aluminium-Kontaktplatte gleicher Größe. Zur Temperaturmessung wird ein Pt-100 Sensor direkt an der Halbleiterschicht im photovoltaisch aktiven Bereich platziert und durch Silikonmasse vergossen und fixiert. Die Temperaturmessung sowie die Zellkontaktierung sind in 4-Leitertechnik ausgeführt. Einen ersten verkapselten Prototypen ohne Nebenschlußwiderstand einer 20x20 mm² a-Si STZ-Komponentenreferenzzellen auf einem 50x50 mm² Substrat zeigt Abb. 2.17.

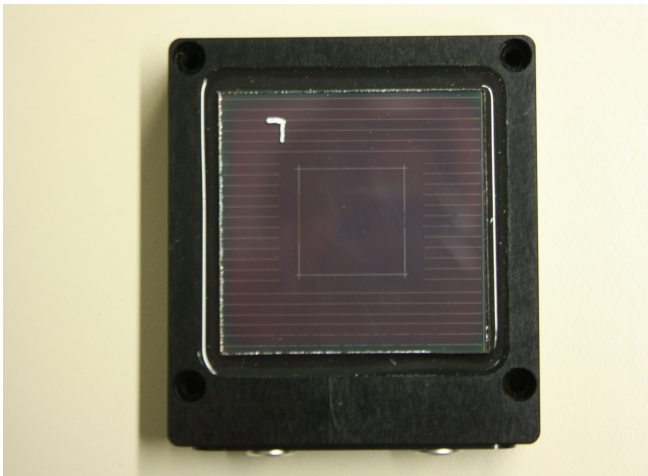


Abb. 2.17 Komponentenreferenzzelle mit Gehäuse und Anschlüssen

Das Temperaturverhalten dieses Prototypen ist vergleichbar mit typischen ISE c-Si Referenzzellen.

Zwischen der Junction-Temperatur der Zelle und der über den Pt-100 ermittelten Temperatur besteht ein linearer Zusammenhang (Abb 2.18). Die Junction-Temperatur wurde dabei aus dem Voc mit Hilfe des Voc-Temperaturkoeffizienten von $T_k=0,33\%/K$ ermittelt.

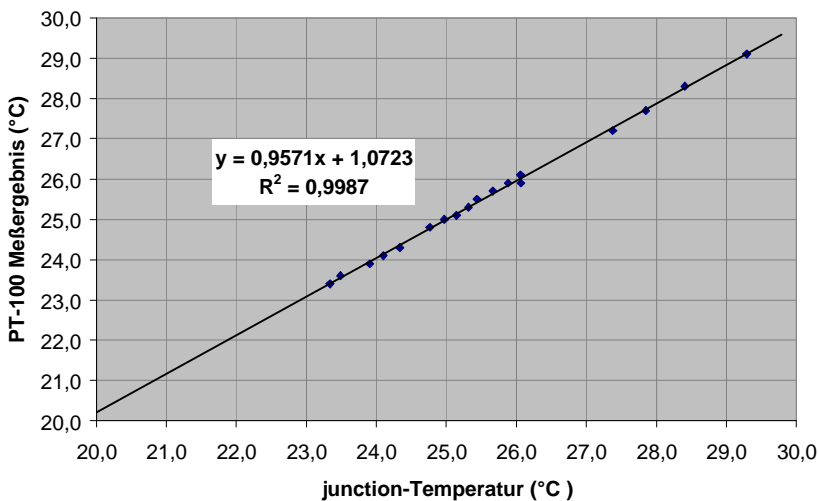


Abb. 2.18 Zusammenhang zwischen der über den PT-100 Fühler und der aus Voc ermittelten Junction-Temperatur

Gut zu erkennen ist die hohe Genauigkeit mit der über den Pt-100 die absolute Zelltemperatur ermittelt wird. Damit erfüllt die gewählt Verkapselungstechnologie die an sie in IEC 60904-2 gestellten Anforderungen für eine gekapselte Referenzzelle.

2.7 Metrologie mit idealen Komponenten-Referenzmodulen

Parallel zur Entwicklung verkapselter 20x20mm² Komponentenreferenzzellen wurden zwei 1,4m² große, mikromorphe Komponenten-Referenzmodule hergestellt. Ein Modul hat dabei die spektrale Empfindlichkeit der mikromorphen Topzelle während das zweite Modul die spektrale Empfindlichkeit der mikromorphen Bottomzelle besitzt. Beide Komponentenmodule repräsentieren mit ihrem Kurzschlussstrom auf Grund ihrer Ausführung als Single-junction-Zelle die spektrale Empfindlichkeit der Top- bzw. der Bottomzelle eines typischen mikromorphen Moduls.

Der spektrale Fehlanpassungsfaktor MMF liegt für diese Module unter einem Prozent, was bedeutet, dass bei der Vermessung des für 1,4 m² große Module geeigneten Flashers der Fa. Halm am Standort Jena („FM-Flasher“) mit diesen Komponentenmodulen die MMF Korrektur praktisch vernachlässigt werden kann. Dieser der Produktion zugehörige FM-Flasher wird dort standardmäßig mit einem a-Si/a-Si-Referenzmodul eingemessen, Die beiden in mikromorpher Technologie ausgeführten Komponentenmodule konnten beim ISE-FhG in Freiburg auf Grund ihres „Single-junction Typs“ nun mit guter Genauigkeit kalibriert werden, was eine deutliche Verbesserung der bisherigen Situation bedeutete, bei der die Messung von Tandem-Junction Module mit erheblicher Unsicherheit behaftet war.

Mit diesen beiden Komponentenmodulen wurde der Status Quo der effektiven Beleuchtungsintensität jeweils für die mikromorphe Top- bzw. Bottomzelle auf Modulebene am FM-Flasher festgestellt. Hierbei ist anzumerken, dass der Flasher der Fa. Halm durch fest eingebaute Filter spektral fixiert ist. Besser geeignet wäre hier selbstverständlich ein spektral einstellbarer Flasher, der z. B. inzwischen von Fa. Berger hergestellt wird.

μmorph Top (SBZ)	Isc	Jsc	Uoc	Pmpp	FF
	[A]	[mA/cm ²]	[V]	[W]	[1]
ISE-Soll	7,85	10,69	15,70	71,30	57,8
FM Schott solar	7,93	10,79	15,75	72,24	57,84
• FM/ISE	1,0%	1,0%	0,3%	1,3%	0,0%

Tab. 2.4 Vermessung des Topzellen-Komponentenmoduls am FM-Flasher und Vergleich mit den ISE Kalibrierwerten.

μmorph Bottom (STZ)	Isc	Jsc	Uoc	Pmpp	FF
	[A]	[mA/cm ²]	[V]	[W]	[1]
ISE-Soll	8,35	11,36	7,18	27,37	45,6
FM Schott solar	7,59	10,33	7,16	25,02	45,99
• FM/ISE	-9,1%	-9,1%	-0,3%	-8,6%	0,8%

Tab. 2.5 Vermessung des Bottomzellen-Komponentenmoduls am FM-Flasher und Vergleich mit den ISE Kalibrierwerten.

Gemäß Tabelle 2.4 liefert das Topzellen-Komponentenmodul am FM-Flasher einen um etwa 1 % zu hohen Kurzschlussstrom, d.h. die Beleuchtungsintensität des Flashers für

die Topzelle liegt etwa ein Prozent zu hoch. Voc und FF zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den ISE Referenzwerten. Für das Bottomzellen-Komponentenmodul ist die Beleuchtungsintensität des FM-Flashers um 9,1 % zu niedrig, d.h. die Bottomzelle wird um etwa 9 % zu gering beleuchtet (Tab. 2.5). Mit einem einstellbaren Flasher würde nun das Spektrum über Filtereinstellungen so korrigiert werden bis mit den beiden Komponentenmodulen die ISE-Kalibrierströme bzw. ISE-Kalibrierleistungen erreicht werden.

Für dem spektral nicht ohne weiteres adaptierbaren FM-Flasher, der standardmäßig auf a-Si/a-Si Technologie einkalibriert ist, haben wir die Korrektur über den Einstrahlungsmittelwert von Top- und Bottomzelle als pragmatische und praxisnahe Korrekturmethode gewählt. Mikromorphe Module, gemessen am FM-Flasher, der auf a-Si/a-Si Technologie eingestellt ist, müssen demgemäß im Isc und in der Modulleistung um 4 % nach oben korrigiert werden.

Abb. 2.19 zeigt das Spektrum des FM-Flashers mit dem, trotz etlicher intensiver Xenon-Linien, in Summe deutlich zu geringer Rotanteil des FM Spektrums gegenüber dem AM1.5 Sonnenspektrum.

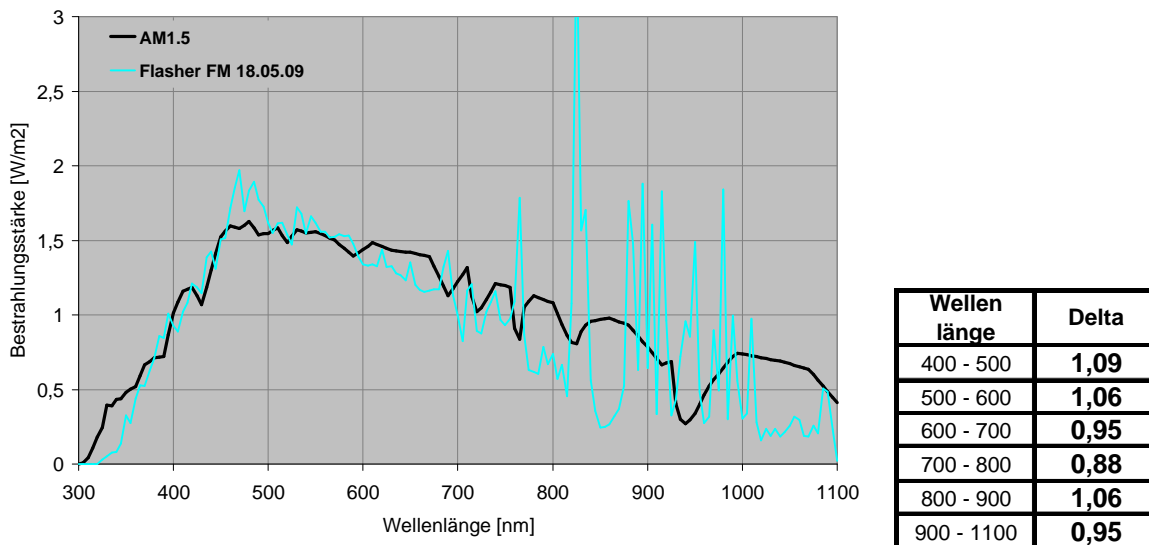


Abb. 2.19 FM-Flasherspektrum im Vergleich zum AM1.5 Sonnenspektrum.

Wie schon oben kurz angesprochen, kann man im Gegensatz zum Flasher von Halm beim Xenonlampen-Flasher der Fa. Berger über ein stufenloses Ein- bzw. Ausblenden eines IR-Filters das Verhältnis von „blauem“ und „rotem“ Spektralanteil variieren und somit die Beleuchtung von Top- und Bottomzelle wie für ein AM1.5 Spektrum einstellen. Der Berger-Flasher wird standardmäßig auf ein kalibriertes a-Si Referenzmodul bei der IR-Filtereinstellung 81 % einkalibriert. Bei dieser Standardeinstellung wurden die beiden Komponentenmodule vermessen (siehe Tab. 2.6). Anschließend wurde der IR-Filter des Berger-Flashers auf Filterstellung 77 % und damit die Beleuchtungsintensität auf die ISE-Soll Werte eingestellt, so, dass die effektive Beleuchtungsintensität für die Top- und Bottomzelle exakt auf AM1.5 angepasst ist.

Isc	ISE-Soll	Berger		Berger	
		Filterstellung 81	Delta	Filterstellung 77	Delta
	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]
µm-Top (SBZ)	7,85	8,80	12,1%	7,83	-0,2%
µm-Bottom (SBZ)	8,35	8,71	4,3%	8,35	0,0%
Delta (Mittelwert)	-	-	8,2%	-	-0,1%

Tab. 2.6 Vermessung des Berger-Flashers für Filterstellungen 81 % (Status Quo) und 77 % (nach Einstellung mit Komponentenreferenzmodulen)

Bei einer vorgefundenen Einkalibrierung des Berger-Flashers auf ein a-Si Single-junction Referenzmodul (Filterstellung 81 %) wird die Topzelle eines mikromorphen Moduls um 12,1% und die Bottomzelle um 4,3% zu hoch bezüglich den Referenzwerten der ISE kalibrierten mikromorphen Komponentenmodule bewertet (Tab. 2.6). Im Mittel ergibt sich also eine um etwa +8 % zu hohe effektive Intensität und damit auch Modulleistung bei dieser vorgefundenen Flashereinstellung. Durch eine nachfolgende spektrale Justage mit den Komponenten-Referenzmodulen (Filterstellung 77 %) konnte der Berger-Flasher sowohl im Matching von Top- und Bottomzellbeleuchtung als auch in der mittleren Beleuchtungsintensität sehr genau auf das AM1.5 Spektrum eingestellt werden.

P _{max}	Berger	Berger	Delta
	Filterstellung 81	Filterstellung 77	
	[W]	[W]	[%]
µm-Schottsolar	135,4	122,6	10,5%

Tab. 2.7 Messvergleich eines mikromorphen Moduls am Berger-Flasher bei IR-Filterstellung 81 und Einkalibrierung auf ein a-Si Referenzmodul mit IR-Filterstellung 77 und Einkalibrierung auf die Komponentenmodule

Ein abschließender Messvergleich am Berger Flasher mit einem stabilisierten 1,4 m² mikromorphen Modul liefert bei der Filterstellung 81 % (Status Quo-Einstellung für mikromorphe Module) 135,4 W, dagegen bei der Filterstellung 77 % (gemäß Schott Solar Methode mit ISE kalibrierten Komponentenreferenzmodulen) nur 122,6 W (siehe Tab. 2.7) also etwa 10 % weniger.

Dieser gravierende Unterschied in der Modulleistung, zeigt die große Unsicherheit und den enormen Bedarf nach höherer Präzision bei der Leistungsmessung von mikromorphen Tandemmodulen. Mit unserer im August 2010 als Patent angemeldeten Methode der Komponentenzellen und -module sind wir überzeugt, einen wesentlichen Betrag, diese Unsicherheiten zu minimieren, geleistet zu haben.

2.8 Innovative Serienverschaltung

Die für die integrierte Serienverschaltung notwendigen drei Laser-Verschaltungslinien werden beim Stand der Technik einzeln, nach Herstellung der jeweiligen Funktionsschicht, an entsprechenden Strukturierungsanlagen (z.B. Split-Axis- oder Gantry-Tisch) ausgeführt. Die drei Verschaltungslinien verlaufen dabei parallel in möglichst geringem Abstand zueinander in gerader Linie. Typischerweise beträgt der Abstand von Linie zu Linie etwa 100 µm. Der notwendige Linienabstand definiert sich aus Linienbreite und der Genauigkeit der Laseranlage. Wenn z.B. die Laseranlage mit einer Genauigkeit von ± 25 µm spezifiziert und die Linienbreite z.B. 50 µm beträgt, können sich zwei benachbarte Verschaltungslinien im ungünstigen Fall gerade berühren, aber noch nicht überschneiden. Wird die dritte Verschaltungslinie mit gleicher Breite und gleichem Abstand ausgeführt, beträgt die gesamte Verschaltungsbreite 250 µm. Die der Verschaltungsbreite entsprechende Fläche ist bei einem Dünnschichtmodul in der Regel inaktive und damit nicht für Leistungserzeugung nutzbare Fläche und beträgt je nach Ausführung zwischen 2 und 10 % der Modulfläche.

Bei der innovativen Strukturierung wird die Serienverschaltung in sogenannte „Nutzsegmente“ und „Kontaktsegmente“ unterteilt.

Für die Evaluation der innovativen Verschaltung wurden auf einem 0,6 m² großen Substrat abwechselnd 100x100 mm² große Solarmodule (jeweils mit 8 in Serie verschalteten Zellen, Zellbreite 10 mm) abwechselnd mit Standard- bzw. innovativer Verschaltung strukturiert.

Module mit innovativer Verschaltung zeigen, gemessen am Sonnensimulator, einen Gewinn im Kurzschlussstrom gegenüber der standardmäßig verschalteten Referenzgruppe um bis zu 2,3 %.

Abschließend kann gesagt werden, dass das Potenzial der Vergrößerung der photovoltaisch aktiven Solarzellenfläche gezeigt worden ist. Der Flächengewinn ist besonders bei Solarmodulen mit insbesondere schmalen Solarzellen von erheblicher Bedeutung und kann den Aperturwirkungsgrad deutlich erhöhen.

Die Methode der innovativen Serienverschaltung wurde im Juli 2010 zum Patent angemeldet.

3. Charakterisierung (Beitrag der SCHOTT AG)

Dieser Beitrag versteht sich als Service- und Unterstützung diverser Arbeitspakete des Gesamtvorhabens. Dem Projekt standen alle Methoden des SCHOTT Analytik-Service zur Verfügung. Einzelne Methoden wurden dabei speziell an die Anforderungen der Si-Dünnschicht angepasst. Hier sind insbesondere zu nennen die Messung tiefenaufgelöster Raman-Profile sowie ein großer Erfahrungshintergrund bei der Interpretation von TOF-SIMS Analysen an Si-Dünnschichtzellen, insbesondere im Hinblick auf die beobachteten Effekte der Lagerinstabilität.

3.1 Erweiterung der Raman-Spektroskopie

Auswertung Raman-Spektren - Peakformparameter

Zur Raman-Charakterisierung wurden über die übliche Auswertung der Kristallinität hinaus Formparameter des kristallinen Peaks ausgewertet. Hierzu wurde eine so genannte Fano-Form des kristallinen Peaks angesetzt, der eine Auswertung bzgl. Peakposition (ω_p), Peakbreite (Γ) und Asymmetrie (q) erlaubt. Die Raman-Charakterisierung erfolgte tiefenaufgelöst durch Charakterisierung von geeignet präparierten Querschliffen.

Es zeigt sich, dass sich unterschiedlich hergestellte mikrokristalline Materialien in $\mu\text{-Si}$ -Einfachzellen bzw. mikromorphen Tandemzellen anhand dieser Parameter unterscheiden lassen. Vor allem die Peaklage ω_p des kristallinen Peaks kennzeichnet das stabile Material vom Typ-II, wobei der Peak hierbei näher an der Position des spannungsfreien Volumen-Siliziums liegt (ca. $520,5 \text{ cm}^{-1}$) als beim Typ-I Material. Dieser Materialparameter könnte für die weitere Optimierung des mikrokristallinen Materials genutzt werden.

Auswertung Raman-Spektren - Wasserstoffbindung

Darüber hinaus wurde der Wellenzahlbereich um 2000 cm^{-1} ausgewertet, der Informationen zum Bindungszustand des Wasserstoffs enthält. Spektren-Auswertungen für Zellen, die unterschiedliches $\mu\text{-Si}$ Material auf unterschiedlichen Saatschichten beinhalten, wurden durchgeführt. Probe 2 ist dabei das typische Typ-II Material, Probe 3 das typische Typ-I Material. Auch hier sind deutliche Unterschiede erkennbar, die sich auf die unterschiedliche Kristallinität der Materialien zurückführen lassen. Probe 4 ist dagegen Material, das auf einer ungünstigen Saatschicht abgeschieden wurde (oxidierte mikrokristalline p-Schicht). Es zeigt sich, dass sich – bei gleicher Kristallinität wie etwa Probe 2 – deutlich veränderte Wasserstoffbindungskonfigurationen ergeben, die mit dieser Methode deutlich nachweisbar sind. Gleichzeitig zeigt sich auch im morphologischen Erscheinungsbild in SEM-Querschnittsaufnahmen ein deutlich stärker kolumnar ausgeprägtes Wachstum bei Probe 4 im Vergleich zu Probe 2 (siehe Abb. 3.1).

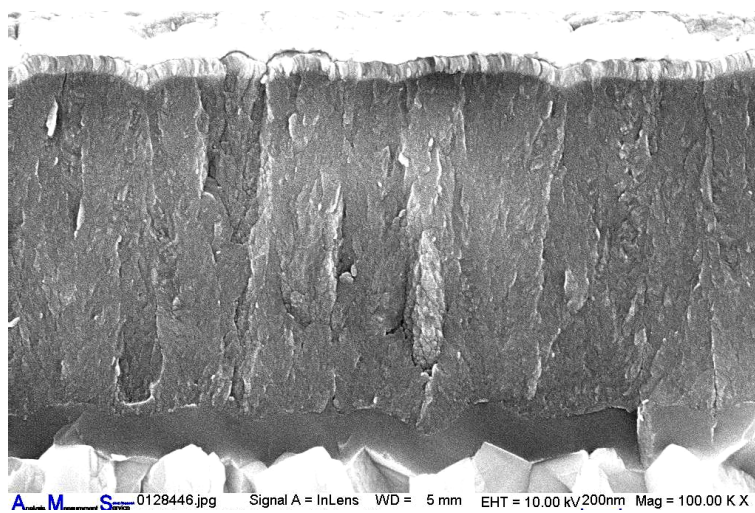
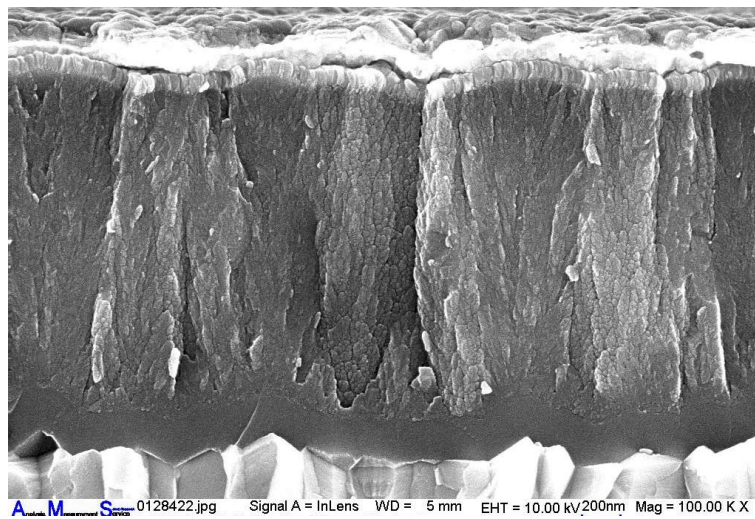
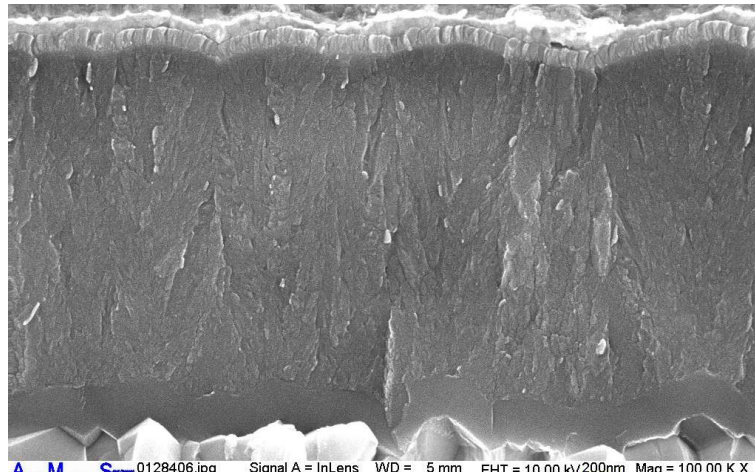


Abb. 3.1 SEM-Querschnittsaufnahmen der Proben 2 bis 4 (von oben nach unten)

3.2 Bestimmung der Eindiffusion von schwerem Wasser (D₂O)

Motivation und Vorgehensweise

Zur Klärung der Frage, ob die Eindiffusion von Wasser bzw. Wasserdampf in $\mu\text{c-Si}$ -Solarzellen eine Rolle bei der Lagerungsdegradation spielt, erfolgten Untersuchungen mit schwerem Wasser (D₂O), das sich physikalisch wie Wasser (H₂O) verhält, aber durch den schweren Wasserstoff mit TOF-SIMS empfindlicher selektiv nachzuweisen ist. Für dieses Experiment wurden Zellen 4 Tage bzw. 7 Wochen in gesättigter D₂O-Atmosphäre bei 50°C gelagert.

Ergebnisse der Lagerung in D₂O-Atmosphäre

Generell ist schwerer Wasserstoff aufgrund von Masseninterferenzen mit H₂ in zwei Signalen nachweisbar: im Mischsignal D/ H₂, das für die betrachteten Proben vom D-Signal dominiert wird, wie aus den Referenzmessungen hervorgeht (alle Probe ohne D₂O-Lagerung zeigen hier kein nachweisbares Signal) und im Mischsignal OD/ ¹⁸O, das aufgrund der Mischung schwer zu trennen ist; dieses Signal wird hier nicht dargestellt, kann aber als Konsistenzprüfung mit herangezogen werden.

Es lässt sich eindeutig nachweisen, dass D₂O nach entsprechender Exposition in die $\mu\text{c-Si}$ -Schichten der Zellen eindringt. Dieser Effekt ist deutlich schneller und stärker bei Zellen ohne Rückkontakt als bei Zellen mit Rückkontakt (Abb. 3.2). Hieraus lässt sich schließen, dass der Standard-Rückkontakt eine gewisse Barrierewirkung in Bezug auf D₂O (und damit vermutlich auch H₂O) besitzt.

Ein dicker TCO-Rückkontakt besitzt eine stärkere Barrierewirkung, wie aus den entsprechenden D₂O-Lagerungsexperimenten hervorgeht (Abb. 3.3).

Auch Material mit starker Lagerungsalterung (Typ-I) unterscheidet sich deutlich von stabilerem Material Typ-II in Bezug auf die D₂O-Eindiffusion (Abb. 3.4), so dass sich mit dieser Methode die Porosität des $\mu\text{c-Si}$ -Materials vergleichend bewerten lässt, die vermutlich grundlegend mit der Lagerungsstabilität des mikrokristallinen Materials zusammenhängt.

Durch die D₂O-Methode lässt sich empfindlicher als mit anderen Methoden nachweisen, an welchen Stellen innerhalb der Zelle sich „Wasser“ bevorzugt anlagert: zunächst an der TCO/ $\alpha\text{-Si}$ -Grenzfläche (erkennbar in Abb. 3.2 bis 3.4), später dann im Volumen der $\mu\text{c-Si}$ -Schicht, wobei tendenziell auch eine leichte Erhöhung an der $\alpha\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$ -Grenzfläche zu finden ist (z.B. in Abb. 3.2), schließlich nochmals leicht erhöht zu Zellrückseite hin, wobei nicht auszuschließen ist, dass hierzu nur adsorbiertes D₂O an der Oberfläche beiträgt.

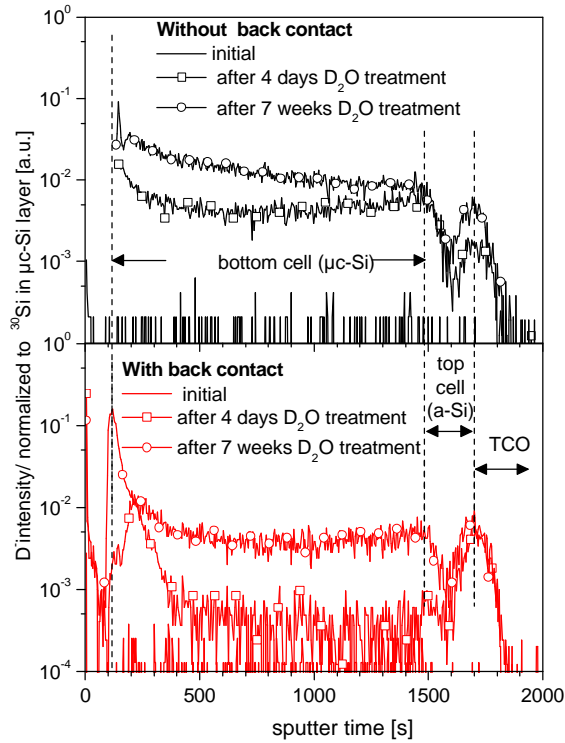


Abb. 3.2 TOF-SIMS-Tiefenprofile der D-Signale von Zellen nach D₂O-Lagerung; oben: ohne Rückkontakt, unten: mit Rückkontakt

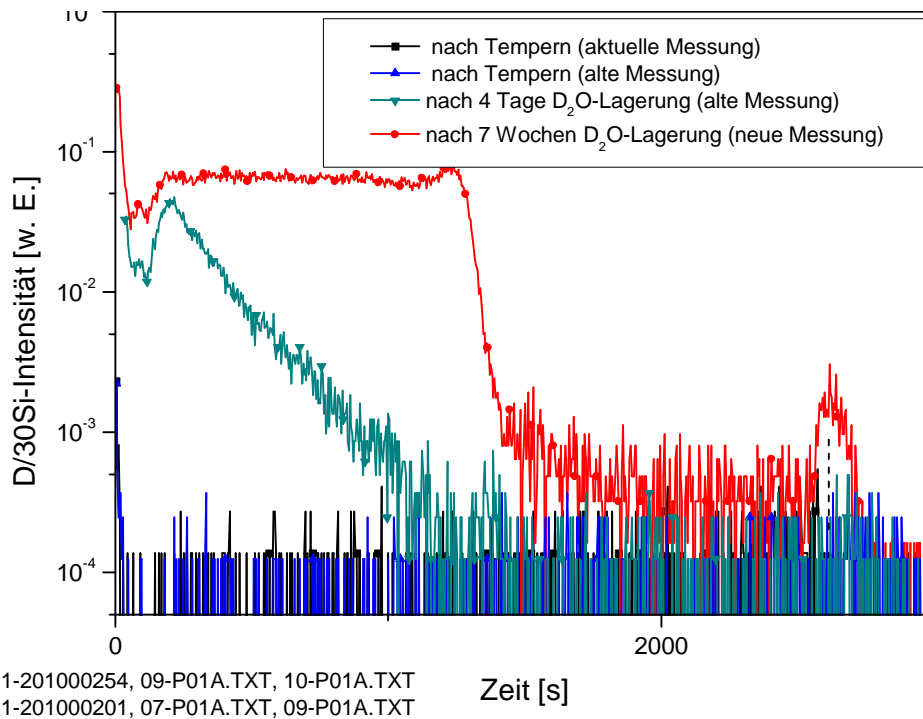


Abb. 3.3 TOF-SIMS-Tiefenprofile der D-Signale von Zellen mit dicker TCO-Rückkontaktschicht nach D₂O-Lagerung

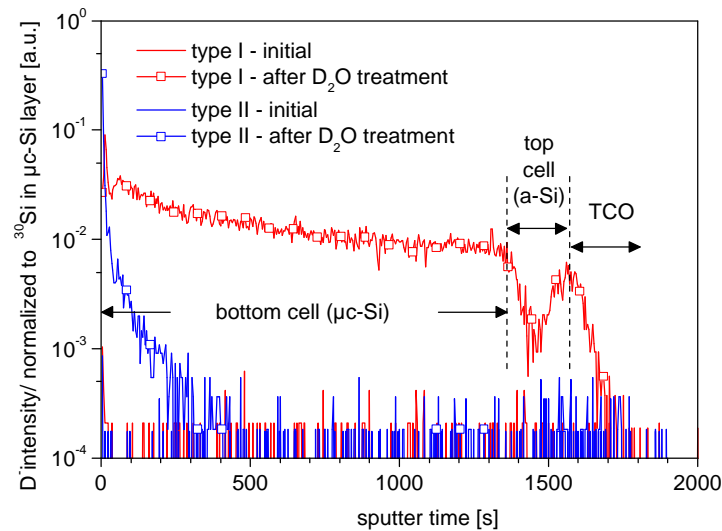


Abb. 3.4 TOF-SIMS-Tiefenprofile der D-Signale von Zellen mit unterschiedlich stabilem $\mu\text{c-Si}$ -Material nach D_2O -Lagerung (Typ-I: starke Degradation, Typ-II: stabiler)

Weitere Experimente zur D_2O -Lagerung

Bei weiteren Experimenten (Abscheidung der Bottomzelle) ergaben sich μmorph -Zellen mit hoher Stabilität. Manche dieser Zellen weisen relativ niedrige V_{oc} -Werte auf – entgegen der bisherigen Korrelation von Lagerungsstabilität mit hoher Leerlaufspannung (die vom „Typ-I Material“ bekannt ist). An drei Proben erfolgten nun die Ramancharakterisierung sowie die Lagerung der Zellen in D_2O -Atmosphäre (50°C , 4 d) mit anschließender TOF-SIMS-Charakterisierung.

Es zeigt sich, dass in die „instabile“ Probe 1 deutlich mehr D_2O eindringt als in die anderen beiden („stabilen“) Proben, wie an dem D-Signal erkennbar ist (Abb. 3.5). Auch der O-Gehalt der $\mu\text{c-Si}$ -Schicht nach D_2O -Lagerung ist bei Probe 1 deutlich höher als bei Probe 2 und 3 (Abb. 3.). Bei den Proben 2 und 3 liegt das D-Signal im Volumen der $\mu\text{c-Si}$ -Schicht an der Nachweisgrenze.

Die Raman-Kristallinität der Proben 1 und 3 liegt im Volumen der $\mu\text{c-Si}$ -Schicht bei 66 %, die der Probe 2 bei 70 % (s. Abb. 3.6). Daher ergibt sich für diese untersuchten Zellen nicht mehr die bekannte Korrelation von niedriger Kristallinität mit hoher Lagerungsstabilität. Offenbar ist in den verwendeten Depositionsregimes mikrokristallines Material herstellbar, das sowohl eine hohe Kristallinität (bis 70 %) als auch eine hohe Lagerungsstabilität aufweist (belegt durch Zelleigenschaften und D_2O -Eindiffusion).

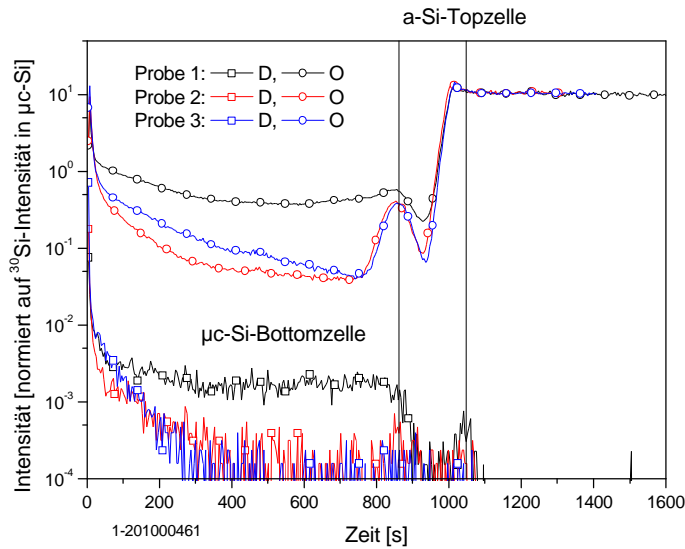


Abb. 3.5 Vergleich der O- und D-Sputterzeitprofile der Proben 1 bis 3 (normiert auf ^{30}Si -Intensität in der $\mu\text{c-Si}$ -Schicht)

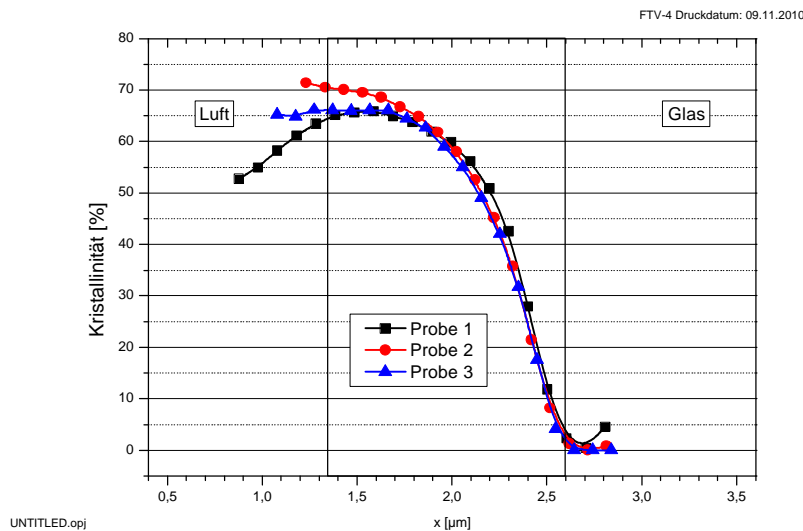


Abb. 3.6 Raman-Profile der Proben 1 bis 3

Mit der gleichen Methodik erfolgte die Charakterisierung von μmorph -Zellen auf unterschiedlich rauen TCO-Substraten. Es zeigt sich, dass sich auch das stabilere (Typ-II) Material auf sehr rauen Substraten mit höherer Porosität aufwächst, da es mehr D_2O aufnimmt als dasselbe Material auf anderen Substraten.

Ebenso erfolgte die Charakterisierung von μmorph -Zellen unmittelbar nach D_2O -Lagerung sowie nach einer anschließenden Temperung, die üblicherweise zur Wiederherstellung der ursprünglichen Zelleigenschaften führt. Wie in Abb. 3.7 dargestellt, ergibt sich durch die Temperung keine Abnahme des in der $\mu\text{c-Si}$ -Teilzelle eingedrungenen D-Gehalts. Daher ist die Lagerungsinstabilität lediglich mit der D_2O -Eindiffusion korreliert. Eine ursächliche Beziehung zur Eindiffusion von Wasserdampf kann daher eher ausgeschlossen werden.

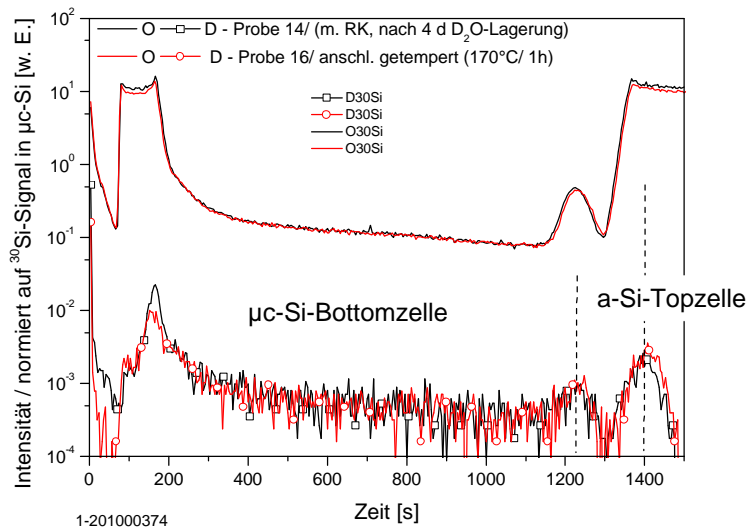


Abb. 3.7 Vergleich der D- und O-Profile einer mikromorphen Tandemzelle mit Rückkontakt nach 4 Tagen D₂O-Lagerung und nach anschließender Temperung

Zusammenfassung

Die Ramanspektroskopie wurde erweitert in Bezug auf zwei „neue“ Auswertemethoden. Die Peakformparameter des kristallinen Peaks sowie eine Analyse der Bindungszustände des Wasserstoffs durch Auswertung des Wellenzahlbereichs um 2000 cm⁻¹ erlauben einen detaillierteren Materialvergleich zwischen Material Typ-I und Typ-II. Aus diesen Verfahren ergeben sich Belege für die zusätzliche Substratabhängigkeit des mikrokristallinen Wachstums.

Durch die Bestimmung der Eindiffusion von schwerem Wasser wurde ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, die Porosität von Schichten und Grenzflächen zu ermitteln. Es ergeben sich umfangreiche Korrelationen mit der Lagerstabilität mikrokristalliner und mikromorpher Zellen. Im Detail ergibt sich, dass das Substrat, auf dem mikrokristallines Material aufwächst einen starken Einfluss auf die Porosität (und Stabilität) des mikrokristallinen Materials hat und dass sich auch mikrokristallines Material mit hoher Kristallinität (70 %) und gleichzeitig hoher Lagerstabilität (und geringer Porosität) herstellen lässt.

4. Light-Management (Beitrag der SCHOTT AG)

Aufgabe des Lightmanagements ist die Unterstützung der Zellenentwicklung bei

- a) der modellbasierten optischen Bewertung und Optimierung des Zelldesigns,
- b) der optischen Charakterisierung von Einzelschichten,
- c) der optischen Bewertung und Optimierung von TCO-Substraten.

Für die Modellierung (a) gibt es bereits aus früheren Arbeiten Kompetenzen bei der Modellierung mit semi-kohärentem Raytracing. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Modellierungstools wird im Bericht detaillierter beschrieben. Im Projekt wurde zudem die Kompetenz bei der rigorosen Modellierung ausgebaut, um auch optische Effekte am rauen Metall-Reflektor modellieren zu können, die mit Raytracing-Methoden nicht erfasst werden können.

Bei der optischen Charakterisierung von Einzelschichten (b) lag der Schwerpunkt auf mikrokristallinen n-Schichten mit durch Sauerstoff-Zugabe abgesenkter Brechzahl.

Beim Themenkomplex TCO-Substrate (c) wurde einerseits eine sehr detaillierte Morphologie-Untersuchung von verschiedenen TCO-Strukturen durchgeführt, andererseits wurden auch Versuche zur Herstellung gänzlich neuer TCO-Strukturen gemacht, die im folgenden detaillierter dargestellt werden.

4.1 Neuartige TCO-Strukturen

Nach dem Stand der Technik gibt es im Wesentlichen drei Typen von TCOs, die für die Herstellung mikromorpher Zellen verwendet werden können:

- APCVD-SnO₂, Strukturausdehnung einige 100 nm; Pyramidenstruktur; kommerziell verfügbar
- Geätztes Sputter-ZnO, Strukturausdehnung im µm-Bereich; Kraterstruktur; Kommerzielle Umsetzung beginnt, und
- LPCVD-ZnO, Strukturausdehnung skaliert mit Schichtdicke; Pyramidenstruktur, ggf. nachträglich geglättet, Beschichtungsanlagen kommerziell verfügbar.

All diesen TCOs ist gemein, dass ihre Oberflächenmorphologie nur in relativ engen Grenzen durch Prozessvariationen variiert werden kann. Die Oberflächenmorphologie wiederum bestimmt die Light-Trapping-Eigenschaften des TCOs, die für eine Erhöhung der Lichtausbeute der Solarzelle wichtig sind. Interessant wäre es daher, die Morphologie unabhängig einstellen zu können. Diese Möglichkeit bieten mit „Nanoimprint“ strukturierte Glassubstrate, die nach der Strukturierung mit TCO-Schichten versehen werden (siehe Abb. 4.1b).

Da sowohl die Nanoimprint-Technologie als auch die Möglichkeit der TCO-Deposition bei der zentrale Forschung und Entwicklung der SCHOTT AG zur Verfügung stehen, konnte dieser auch international sehr beachtete Ansatz im Rahmen des Projekts experimentell verfolgt werden.

Zusätzlich ergibt sich aus der bei der SCHOTT AG vorhandenen Flüssigbeschichtungs-Kompetenz auch die Möglichkeit, durch das Einbringen von Nanopartikeln in eine Sol-Gel Schicht selbstorganisierte Strukturen als Grundlage für die TCO-Beschichtung herzustellen (Abb. 4.1c).

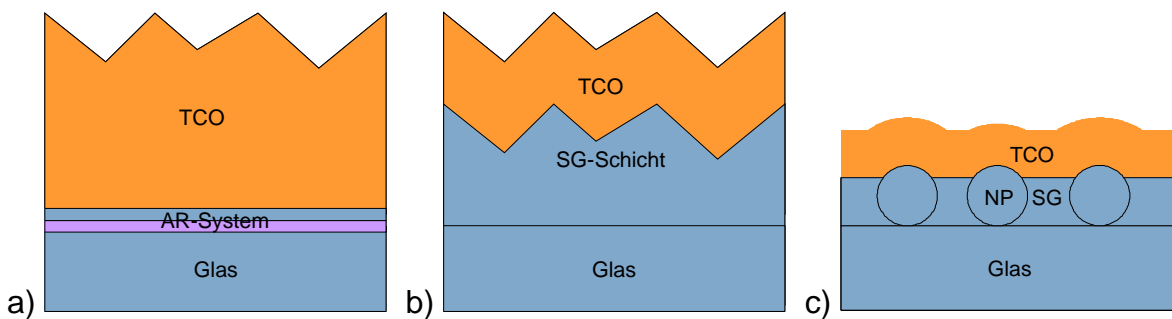


Abb. 4.1 Schema der heute verwendeten TCO-Lösung (a) sowie neue Möglichkeiten der Strukturdefinition, die durch Nanoimprint (b) oder durch Einbau von Nanopartikel (NP) in Sol-Gel (SG) (c) ermöglicht werden

ZnO auf Nanoimprint-Substraten

Beim verwendeten Nanoimprint-Verfahren wird die Oberflächenmorphologie einer Masterstruktur in eine Sol-Gel Schicht auf einem Glassubstrat abgeprägt, wie das in Abb. 4.2 dargestellt ist.

Nach der Herstellung der „Strukturvorlage“ muss das Substrat noch mit einer TCO-Schicht versehen werden. Hier bietet sich das Sputtern von ZnO oder ITO an. Das Sputtern von ZnO ist ein Prozess, der auch großtechnisch für die Herstellung von TCO geeignet ist. ITO-Schichten sind wegen der hohen Kosten und geringer Plasmaresistenz höchstens für Laborfragestellungen interessant.

Die ersten Versuche zur Herstellung von Nanoimprint-TCO mit ZnO zeigten, dass die resultierende Morphologie der Substrate aus einem komplexen Wechselspiel der Nanoimprint-Strukturvorlage mit der Eigenstruktur des ZnO ergibt. Dies zeigt z.B. Abb. 4.3, wo eine nominell identische ZnO-Schicht einmal auf eine flache, einmal auf eine tiefe Kreuzgitterstruktur abgeschieden wurde. Die Tiefe der Kreuzgitter ergibt sich aus dem unterschiedlichem Schrumpfung der verwendeten Sole, der Prägestempel für beide Kreuzgittervarianten war identisch. Das ZnO in den Tälern des flachen Kreuzgitters zeigt eine sehr feine Morphologie, während es auf den Spitzen und Graten eine grobe, kristalline Struktur hat. Beide Strukturen aus Abb. 4.3 dürften für die Abscheidung von mikromorphen Zellen nur für grundsätzliche Untersuchungen zum Wachstumsverhalten von $\mu\text{-Si}$ interessant sein. Für die Abscheidung hochwertiger $\mu\text{-Si}$ Absorberschichten sind die Flankenwinkel der Strukturen vermutlich zu steil. Dennoch zeigt das Beispiel eindrucksvoll, welche Möglichkeiten der Strukturzeugung sich aus der Kombination von Nanoimprint und TCO-Beschichtung ergeben.

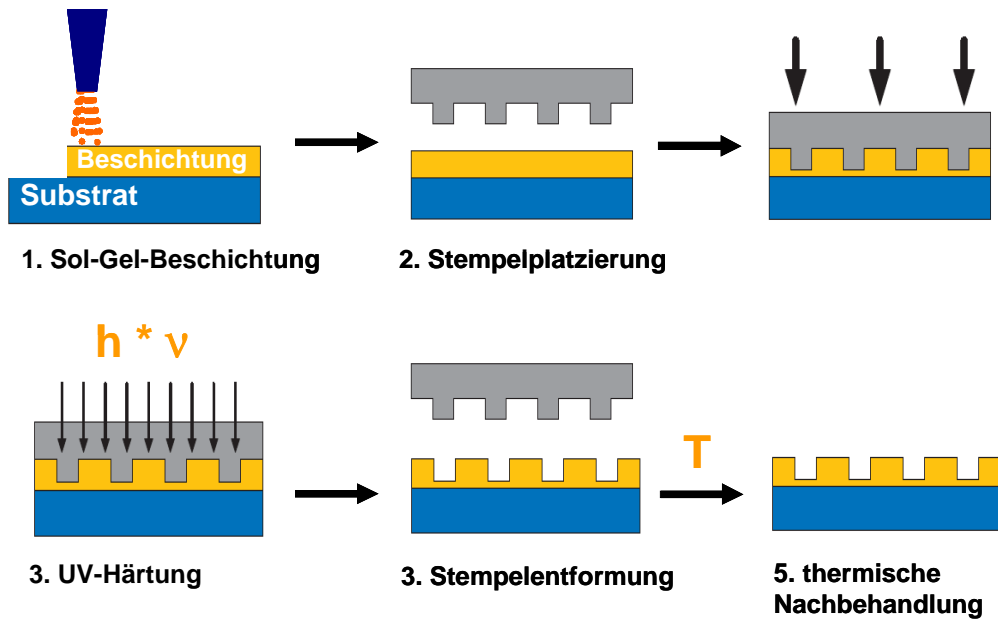


Abb. 4.2 Schema der Strukturzeugung mittels Nanoimprint in SolGel

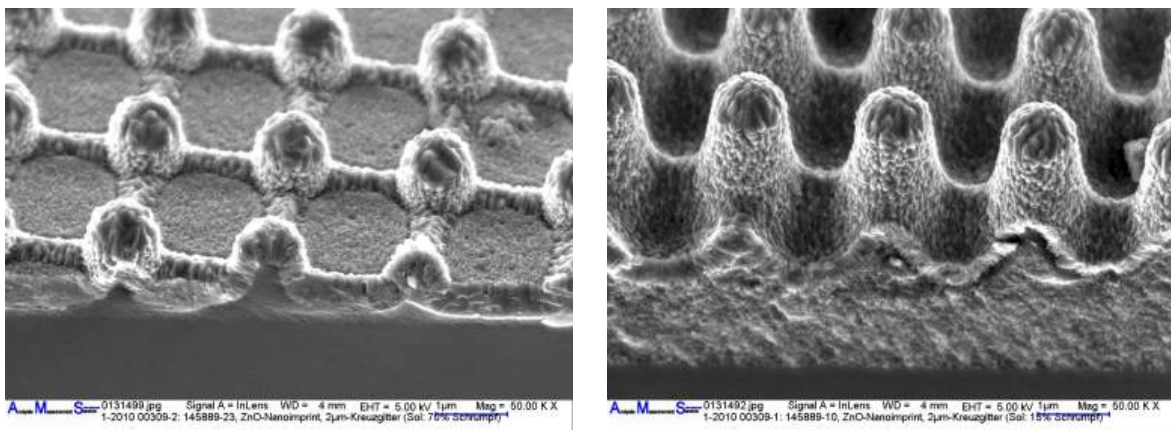


Abb. 4.3 REM-Bruchkanten von mit ZnO überwachsenen Kreuzgitterstrukturen. Die Nanoimprint-Strukturen wurden von ein- und demselben Master abgeprägt. Sole mit unterschiedlichem Schrumpfung führten zu verschiedener Strukturtiefe

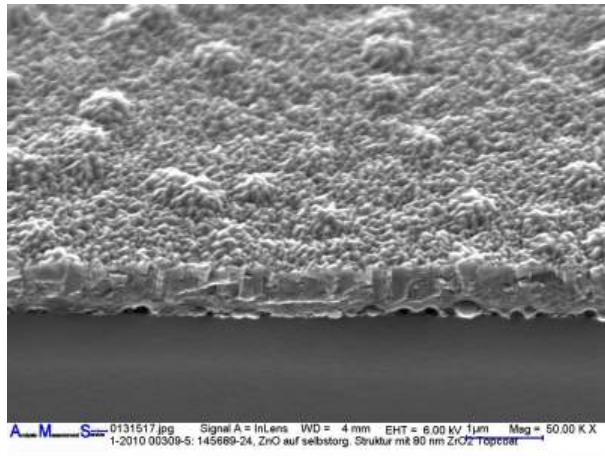


Abb. 4.4 ZnO auf einem Substrat aus Nanosphären, die in einer Sol-Gel Schicht eingebettet sind.

Ein Beispiel für die Kombination von Sol-Gel Schichten mit Nanopartikeln mit der TCO-Beschichtung zeigt Abb. 4.4. Hier wird die Eigenrauigkeit des ZnO durch die „Hügellandschaft“ der überwachsenen Nanosphären moduliert. Hier ist ein gutes Wachstumsverhalten der darauf zu beschichtenden Absorberschichten zu erwarten.

Elektrische Eigenschaften

Wichtigste Eigenschaften einer TCO/Schicht sind neben der hier diskutierten Morphologie eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit und eine geringe Absorption im solaren Spektrum. Untersuchungen an den bisher hergestellten Proben zeigten, dass die Leitfähigkeit insbesondere der stark strukturierten Proben deutlich hinter glatten Proben zurückblieb. Es stellte sich die Frage, ob das ein Material- oder ein Geometrieeffekt ist. Letzteres konnte durch FEM-Simulationen bestätigt werden (Abb. 4.5): Das TCO auf den Strukturspitzen trägt kaum zum Stromfluss bei. Die größten Ströme fließen im Tal, wodurch der effektiv nutzbare „Leitungsquerschnitt“ sinkt und der Widerstand um den Faktor 1,7 steigt. Experimentell wurde ein Faktor 1,9 beobachtet.

Damit spricht neben dem negativen Einfluss auf das Schichtwachstum auch die Widerstandserhöhung gegen zu starke Modulationen.

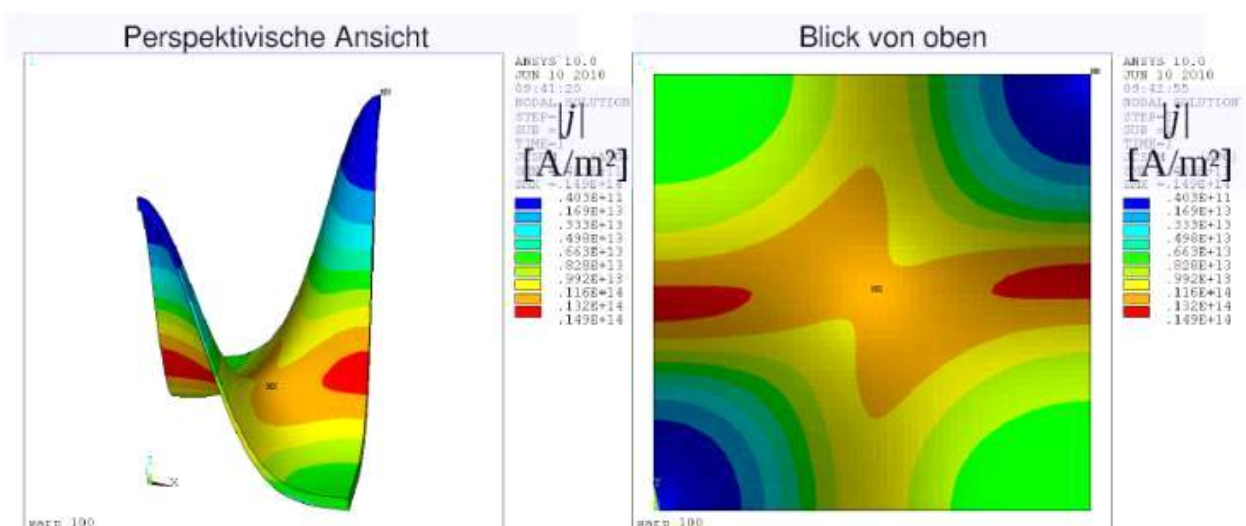


Abb. 4.5 FEM-Modell des Stromflusses durch eine ZnO-Schicht auf einer stark modulierten Kreuzgitterstruktur

ITO auf Nanoimprint-Substraten

Die vorangegangenen Beispiele zeigen, dass sich durch ZnO auf strukturierten Substraten die Vielfalt erzeugbarer Strukturen wie gewünscht erweitern lässt. Allerdings gelingt die klare Separation von Morphologie und elektrischen Eigenschaften und die einfache Zuordnung zum Nanoimprint-Substrat bzw. zur TCO-Beschichtung so nicht. Dies ist jedoch möglich, wenn ITO an Stelle von ZnO verwendet wird: ITO hat bei vergleichbarer Transparenz eine deutlich bessere Leitfähigkeit und kann daher als dünnere TCO-Schicht abgeschieden werden, wodurch sich die Formtreue der TCO-Bedeckung naturgemäß verbessert. Auch wenn ITO aus Kostengründen nicht als Solar-TCO in Frage kommt, ist diese konforme Substratbedeckung für die grundsätzliche Bewertung von Strukturvarianten interessant. Daher wurden u.a. die bereits diskutierten Kreuzgitterstrukturen ergänzend auch mit ITO an Stelle von ZnO beschichtet.

Abb. 4.6 zeigt den Haze, d.h. das Verhältnis von diffus transmittiertem zum gesamten transmittierten Licht für beide Varianten. Der eindeutig periodische Verlauf der Hazekurve für die ITO-Probe ist auf Beugungseffekte am Kreuzgitter zurückzuführen, während die „Störungen“ im Haze-Spektrum der ZnO-Probe Beiträge der ZnO-Eigenrauhigkeit sind. Die REM-Untersuchungen in Abb. 4.7 zeigen die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden TCO-Typen und bestätigen diese Hypothese.

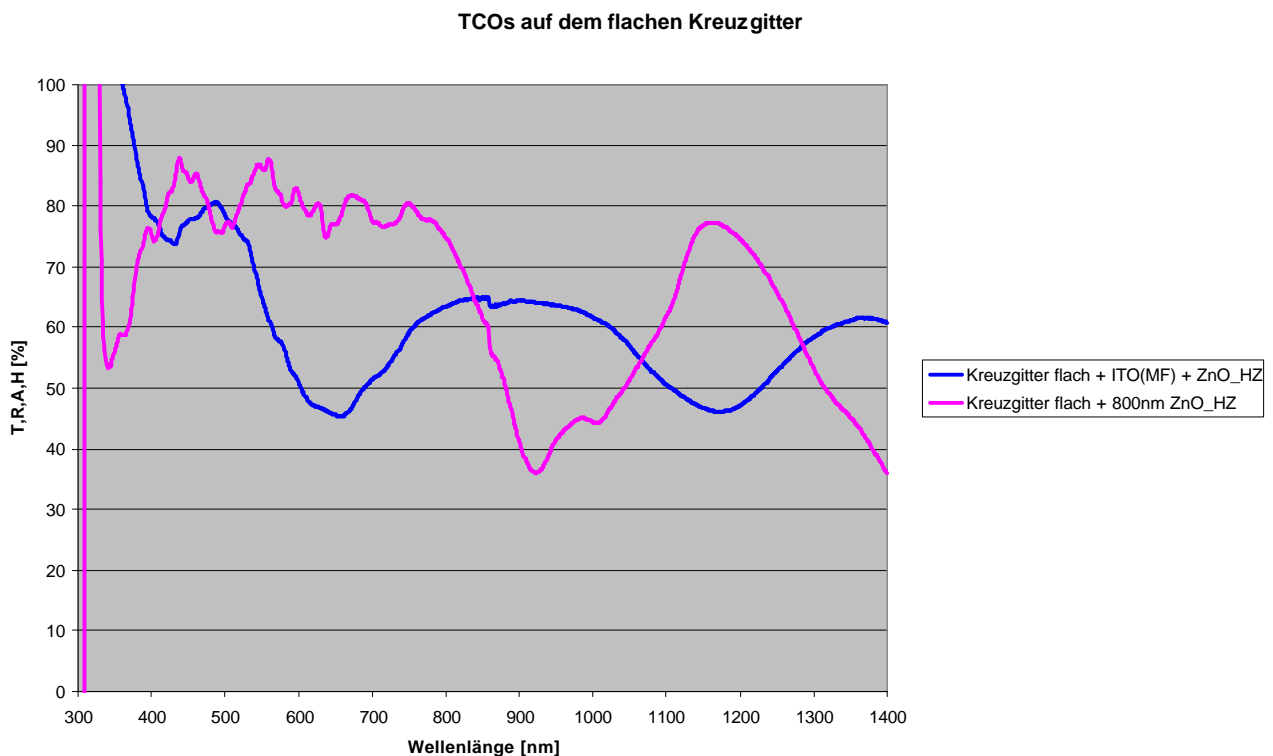


Abb. 4.6 Haze einer flachen Kreuzgitterstruktur mit ITO bzw. ZnO. Insbesondere im kurzwelligen Spektralbereich trägt die Rauigkeit des ZnO zum Haze bei

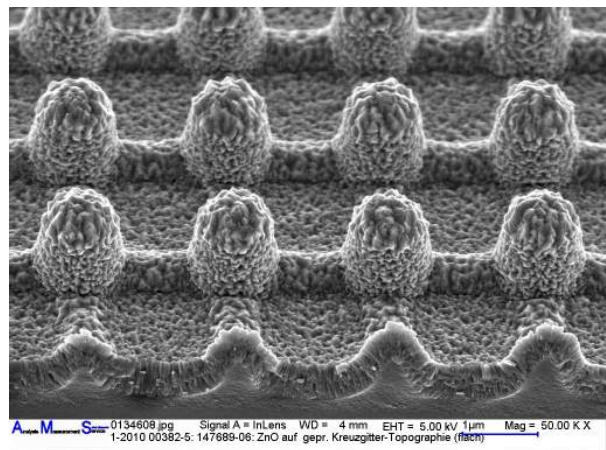
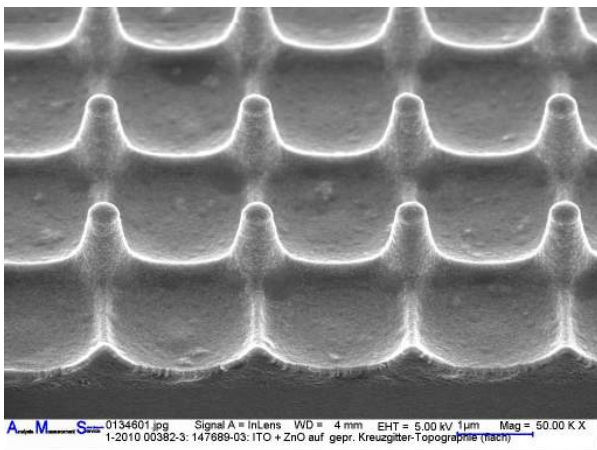
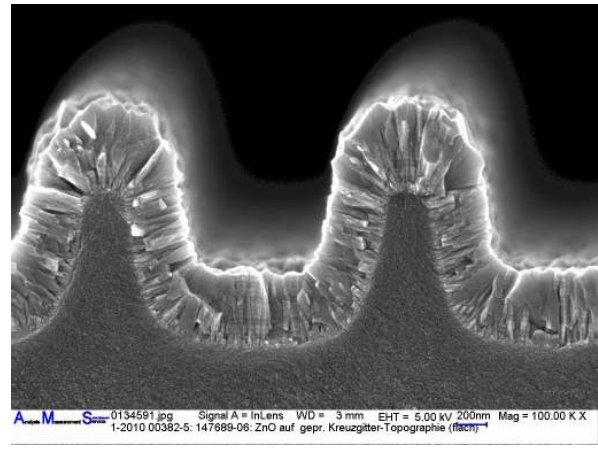
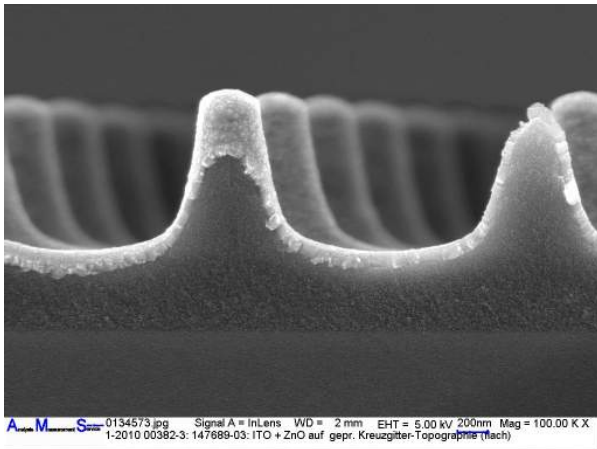


Abb. 4.7 REM-Untersuchungen der Struktur „Kreuzgitter flach“, mit 100 nm ITO + 10 nm ZnO (links) und mit ca. 800 nm ZnO (rechts) beschicht

Im Anschluss an die Untersuchungen des TCOs auf strukturierten Substraten wurden auf verschiedenen Substratvarianten a-Si und mikromorphe Tandemzellen abgeschieden. Zur Verwendung kamen hier die folgenden Substrattypen:

- „flache“ Kreuzgitterstruktur mit 100 nm ITO + 10 nm ZnO,
- „flache“ Kreuzgitterstruktur mit 800 nm ZnO und
- „tiefe“ Kreuzgitterstruktur mit 800 nm ZnO.

Der Terminus „flache“ Kreuzgitterstruktur ist nur in Relation zur „tiefen“ Struktur zu sehen, die mit einem SolGel mit höherem Schrumpfung abgeprägt wurde. Absolut gesehen ist das Verhältnis von Tiefe (ca. 1 µm) zu Periode (2 µm) nach wie vor nennenswert.

Die so entstandenen Zellen wurden bezüglich Reflexion, IV-Kennlinien und Quanteneffizienz charakterisiert und zusätzlich am Raster-Elektronenmikroskop untersucht.

Reflexionsmessungen

Die Reflexion im kurzwelligen Spektralbereich unterhalb von 650 nm ist ein Maß für die Güte der Lichteinkopplung vom TCO in die Zelle. Hier sind die mikromorphen Zellen auf strukturierten Substraten etwas besser (Kreuzgitter „tief“ + ITO) oder leicht schlechter

(Kreuzgitter „flach“) als der durch das Asahi gegebene Stand der Technik (Abb. 4.8). Im langwelligen Spektralbereich >650 nm zeigt eine geringe Reflexion ein gutes Light-Trapping-Potenzial, da offensichtlich viel Licht in der Zellstruktur bleibt. Hier zeigen alle Zellen auf strukturierten Substraten sehr gute Werte gegenüber dem Stand der Technik. Wie stark das Licht in den photoaktiven Absorberschichten absorbiert wird und wie viel in anderen Teilen des Schichtstapels verloren geht, kann jedoch auf Grund der Reflexionsmessung nicht differenziert werden.

Eine ähnliche Bewertung erfolgte auch für a-Si Tandemzellen, die ebenfalls auf dem Kreuzgitter mit 2 μ m Periode abgeschieden wurden. Hier blieb die Performance jedoch hinter den Zellen auf Asahi zurück.

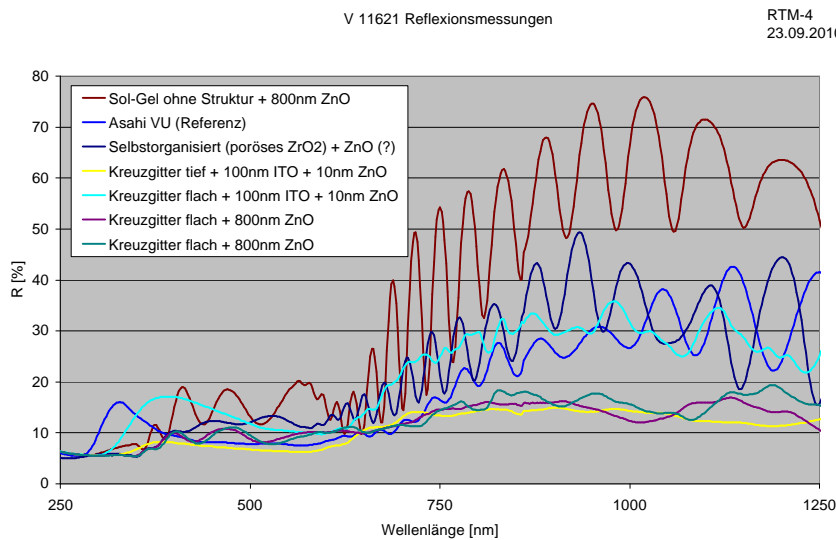


Abb. 4.8 Reflexionsspektren von mikromorphen Zellen auf strukturierten Substraten im Vergleich zu Referenzzellen auf glattem Substrat bzw. auf Asahi

IV-Kennlinien und Quanteneffizienzmessung

Eine eindeutige Light-Management Bewertung der strukturierten Substrate wäre mittels der QE-Spektren möglich. Leider ließen sich an den Zellen jedoch keine QE-Spektren messen. Die IV-Kennlinien der Zellen weisen auf Shunts als Fehlerursache hin.

REM-Aufnahmen

Aus den REM-Aufnahmen der Zellen ergeben sich keine Hinweise auf strukturimane Defekte. Vielmehr zeigen die Aufnahmen eine sehr regelmäßige Struktur und auch eine durchgehende Schichtbedeckung. Hier ist auffällig, dass die amorphe Schicht noch recht gleichmäßig abgeschieden wird (Abb. 4.9), während die Schichtdicke der mikrokristallinen Schicht auf den „Köpfen“ der Struktur größer ist, als in der Ebene (Abb. 4.10). Insgesamt ergibt sich ein sehr komplexes Wechselspiel aus Substratmorphologie und Schichtwachstum, so dass die resultierende Morphologie der Zelloberfläche sich vollkommen von der Ausgangsstruktur unterscheidet. Aus den REM-Aufnahmen lässt sich der bei den Reflexionsmessungen beobachtete Performance-Unterschied zwischen den a-Si und den mikromorphen Zellen gut erklären: Die Ausdehnung der a-Si „Zellköpfe“ ist deutlich geringer als die Periode des Kreuzgitters, so dass sich flache Bereiche dazwischen ergeben, die nicht zum Light-Management beitragen. Hier besteht deutliches Optimierungspotential hinsichtlich angepasster Strukturgrößen.

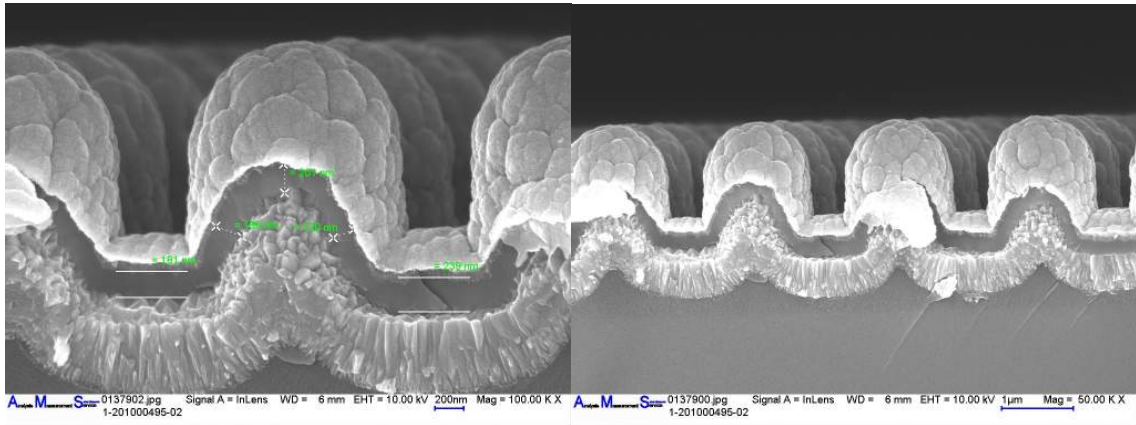


Abb. 4.9 REM-Aufnahmen von a-Si Zellen auf strukturiertem Substrat („flaches“ Kreuzgitter)

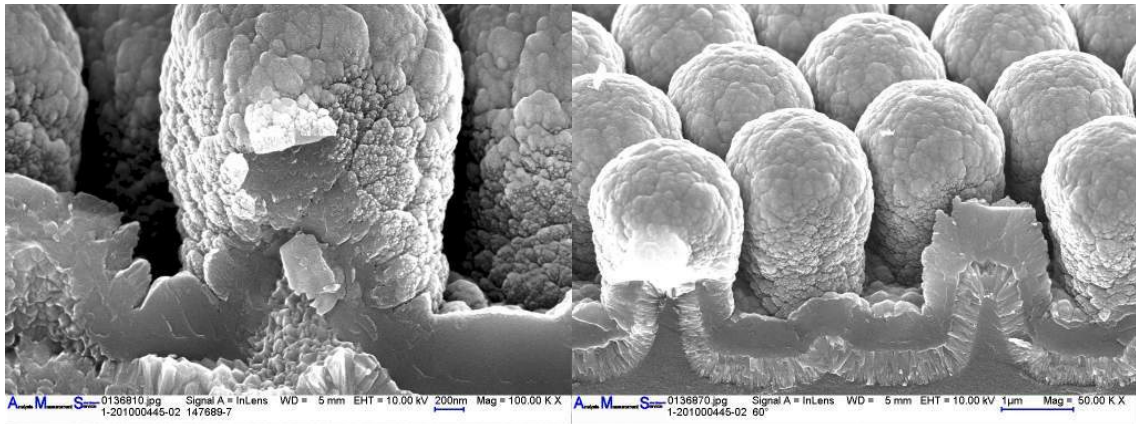


Abb. 4.10 REM-Aufnahmen von mikromorphen Zellen auf strukturiertem Substrat („flaches“ Kreuzgitter)

4.2 SunShine Modellierung

Zur optischen Modellierung von Si-Dünnschicht-Solarzellen stehen einerseits rigorose Methoden zur Verfügung, die aber auch bei Nutzung von Supercomputern zur Zeit noch nicht in der Lage sind, eine komplette Dünnschichtzelle auf stochastisch strukturierten Substraten mit guter Prognosesicherheit zu modellieren. Andererseits gibt es angepasste Strahlverfolgungsalgorithmen („Semi-Coherent Raytracing“), die wiederum den Einfluss dünner, rauer Schichten im Zellaufbau nicht richtig wiedergeben. Dieser Algorithmus steht uns in Form der Software „SunShine“ von der Universität Ljubljana zur Verfügung.

Bei der SunShine-Modellierung wird versucht, die durch das TCO-Substrat vorgegebene Mikrostruktur der optischen Grenzflächen phänomenologische z.B. durch Parameter einer Streuwinkelverteilung zu beschreiben. Letztendlich führt dieser Ansatz zu einer großen Zahl von „freien“ Fitparametern, die nicht eindeutig aus Charakterisierung von Einzelschichten abgeleitet werden können. Um dennoch prognosefähige Modelle aufzustellen, nutzt man diese Freiheitsgrade, um das Modell an die optischen Parameter (z.B. Reflexions- und Transmissionsspektrum sowie Quanteneffizienz-Spektren) einer gut charakterisierten Referenzzelle anzupassen und so einen „Arbeitspunkt“ für

anschließende Parametervariationen festzulegen. Hier dürfen natürlich nur solche Parameter variiert werden, die im Modell zuverlässig abgebildet werden können, wie z.B. die Absorberschichtdicken. Die Variation einer nur wenige Nanometer dicken dotierten Schicht wird jedoch keine zuverlässige Modellprognose erlauben.

Mit dem oben skizzierten Verfahren wurde eine mikromorphe Tandemzelle modelliert. Die Dispersionsdaten der Einzelschichten wurden – so weit möglich – aus Messungen an Einzelschichten abgeleitet. Die im Modell angesetzten Schichtdicken entsprachen den Nominalwerten. Eine gute Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen R-, T- und QE-Spektren wurde erreicht, wenn man annimmt, dass die Streukeulen an internen, rauen Grenzflächen Ellipsen mit einem Halbachsenverhältnis von 0.8 sind. Bei ideal Lambert'sch streuenden Grenzflächen wäre das Halbachsenverhältnis 1.0.

Ausgehend von dem so kalibrierten Modell wurden die Kurzschlussstromdichten von Top- und Bottomzelle für verschiedene Schichtdicken modelliert. Der Vergleich mit gemessenen Werten von Zellen, bei denen ebenfalls die Schichtdicken variiert wurden, ist in Abb. 4.11 dargestellt. Die Übereinstimmung ist recht gut und liegt in etwa im Rahmen der experimentellen Unsicherheit. Nachdem das Modell auf diese Weise bestätigt wurde, wurden die Schichtdicken über einen noch weiteren Bereich variiert (siehe Abb. 4.12). Die Modellierung zeigt, dass man mit Topzellen-Schichtdicken unter 300 nm ohne weitere Maßnahmen (wie z.B. einem Intermediate Reflektor) Stromdichten über 12 mA/cm² nicht erreicht werden können. Das ändert sich auch bei einem verbesserten TCO nicht wesentlich (welches hier durch die Annahme von Lambert-Streuung an der Grenzfläche modelliert wird). Jedoch kann durch das ein verbessertes TCO die Schichtdicke der Bottomzelle nennenswert von ca. 1700 nm auf 1500 nm reduziert werden.

Dieses Beispiel zeigt anschaulich auf, wie die SunShine Modellierung sinnvoll zur Unterstützung der Zellenentwicklung eingesetzt werden kann. Andere Fragen, wie z.B. die genauen Vorgänge am metallischen Rückreflektor auf rauem Substrat, können dagegen sinnvoll nur mit rigorosen Methoden berechnet werden, die dafür auch geeignet sind, wenn man das Rechenvolumen entsprechend auf den Rückkontakt reduziert.

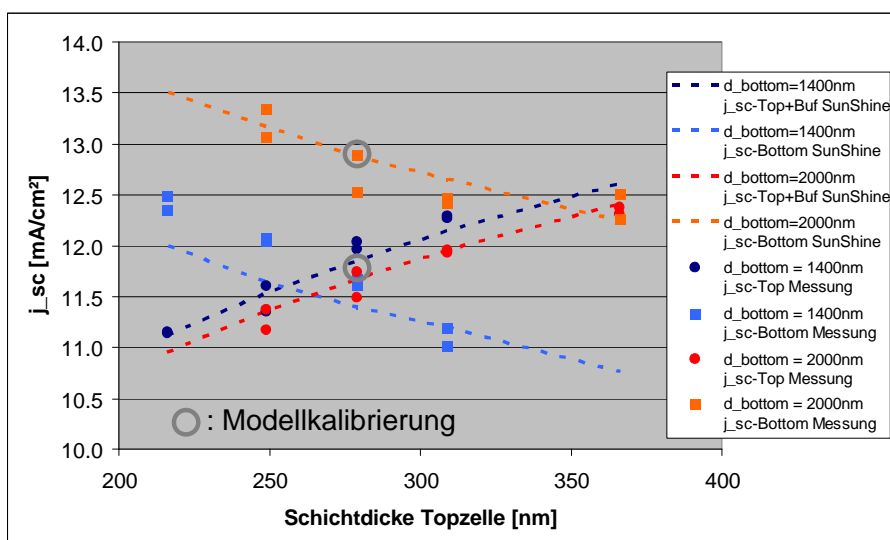


Abb. 4.11 Vergleich von Messdaten und Modellierung für die Abhängigkeit des Kurzschlussstroms von der Schichtdicke der Topzelle. Das Modell wurde auf den eingezeichneten „Arbeitspunkt“ kalibriert

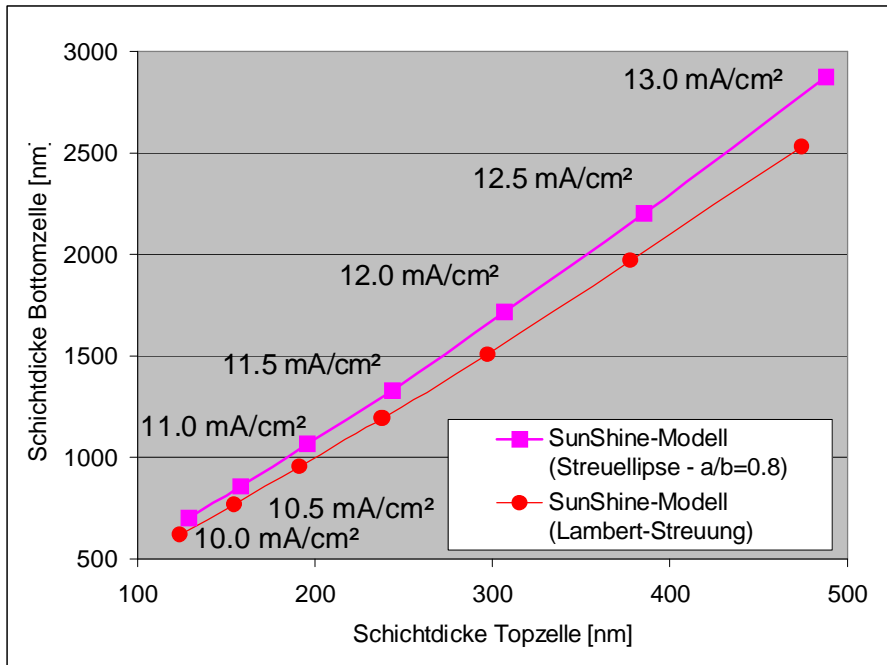


Abb. 4.12 SunShine-Berechnung des Schichtdickenverhältnisses von Top- und Bottomzelle