

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Förderkennzeichen: 01DK23004

Laufzeit: 01.01.2022 - 31.12.2024

Verbundprojekt:

### **Kostengünstige, umweltfreundliche und hocheffiziente polykristalline $\text{Sb}_2\text{S}_x\text{Se}_{3-x}$ -Dünnschichtsolarzellen (EnvSol)**

Teilvorhaben:

### **Lösungsprozessierte polykristalline $\text{Sb}_2\text{S}_x\text{Se}_{3-x}$ - Dünnschichtsolarzellen**

#### **Projektkonsortium:**

- Prof. T.M. Razykov, Photoelectronics Laboratory, Physical-Technical Institute, Tashent, Uzbekistan (PTI)
- Prof. L. Schmidt-Mende, Hybrid Nanostructures, Dept. of Physics, University of Konstanz, Germany (UKON)

#### **Projektleiter**

- Prof. L. Schmidt-Mende, Hybrid Nanostructures, Dept. of Physics, University of Konstanz, Germany (Email: [Lukas.Schmidt-Mende@uni-konstanz.de](mailto:Lukas.Schmidt-Mende@uni-konstanz.de))

## Teil I: Kurzbericht (max 2 Seiten)

### Aufgabenstellung und Stand der Wissenschaft

Neuartige Materialien für Solarzellen müssen heutigen Anforderungen genügen, was deren Wirkungsgrad, aber ebenso deren Verfügbarkeit angeht. Sie müssen stabile und reproduzierbare Zellen liefern können und dürfen gleichzeitig keine Gifte freisetzen, was Materialgewinnung, Materialverwendung und Herstellung angeht. Aus dieser Sicht sind SnS und FeS<sub>2</sub> sehr interessante Materialien, obwohl noch intensive Forschungsarbeit zur Herstellung eines einfachen Abscheidungsprozesses und einer geeigneten Pufferschicht erforderlich ist, um einen hocheffizienten und kostengünstigen Abscheidungsprozess zu finden. Selbst führenden Labore haben durch diese komplizierten und sensiblen Herstellungsprozesse bisher nur einen sehr geringen Wirkungsgrad erreicht. Andererseits haben etwa 10 Jahre Forschungsinvestitionen in CZTS sehr ermutigende Fortschritte gezeigt, jedoch ist der Gesamtwirkungsgrad noch weit von den traditionelleren Technologien wie CdTe- und CIGS-basierten Solarzellen entfernt. Aus diesem Grund besteht nach wie vor ein starker Bedarf an der Untersuchung neuer photovoltaischer Materialien mit einem einfachen und kostengünstigen Abscheidungs- bzw. Herstellungsprozess, der hohe Wirkungsgrade liefern kann.

Das Ziel dieses Projekts war es neue Dünnschicht-Solarzellen basierend auf reichlich vorhandenen und ungiftigen Materialien mit großem Potenzial für hohe Effizienz und kostengünstige Produktion zu liefern. Als Material haben wir uns dafür Sb<sub>2</sub>S<sub>x</sub>Se<sub>3-x</sub> herausgesucht, was schon vielversprechende Ergebnisse geliefert hat.

Durch die Differenzierung verschiedener Herstellungsverfahren sollte festgestellt werden, welche Methoden am vielversprechendsten im Hinblick auf die Herstellung, deren Reproduzierbarkeit und Effizienz, ist. Wir haben Sb<sub>2</sub>S<sub>x</sub>Se<sub>3-x</sub> verwendet, dessen Bandlücke durch den Anteil x beeinflusst werden kann. In diesem Projekt wurde der Herstellungsprozess dieser Solarzellen optimiert und eingehend untersucht. Wir konnten die Bandlücke zwischen 1,5 – 1,8 eV je nach Konzentration des Selen-Anteils variieren.

Die Herstellung der Filme hat in den verschiedenen Laboren stattgefunden, da hier ganz unterschiedliche Herstellungsmethoden angewandt wurden und somit verglichen werden könnten. An der Universität Konstanz wurden die Halbleitermaterialien aus Lösung prozessiert, während sie am Physical-Technical Institute, Usbekistan (PTI) durch eine neuartige und kostengünstige chemische Molekularstrahlabscheidung (CMBD) bei atmosphärischem Druck hergestellt wurden. Dabei wurden durch Laborbesuche der Mitarbeiter des PTI deren Filme auch hier untersucht und verwendet, um einen direkten Vergleich zu bekommen.

Im Rahmen des Projektes wurde die Filmqualität der Sb<sub>2</sub>S<sub>x</sub>Se<sub>3-x</sub> Schichten untersucht. Zur Untersuchung der Schichten wurden verschiedene Methoden verwendet. So wurden das Absorptionsverhalten untersucht, insbesondere unter Berücksichtigung der Se-Dotierkonzentration in den Filmen. Wie erwartet, hat dies zu einer Änderung der Bandlücke geführt, die damit in einem gewissen Bereich angepasst werden kann. Es gab gewisse Probleme bei der Homogenität der Schichten, insbesondere ihrer Rauigkeit. Diese Inhomogenität die zu Problemen bei der Reproduzierbarkeit geführt hat (insbesondere nochmal verstärkt bei den Filmen, die über CMBD abgeschieden wurden). Dies hat dazu geführt, dass die mit CMBD abgeschiedenen Schichten bisher leider nicht die Performance bringen, da ihre Rauigkeit nicht zulässt, gute Zellen daraus herzustellen. D.h. hier ist weiterer Optimierungsbedarf für die Herstellungsparameter notwendig, um die Rauigkeit zu reduzieren. Trotz Verbesserungen im Laufe des Projektes war die Zeit leider zu kurz, um hier die Filmqualität zu erhalten, die für hocheffiziente Solarzellen notwendig gewesen wäre.

Die Filmqualität (und somit auch die Effizienz der daraus resultierenden Solarzellen) konnte verbessert werden. Hauptverantwortlich für eine verbesserte Filmqualität war das Optimieren des Syntheseprozesses des  $\text{Sb}_2\text{S}_x\text{Se}_{3-x}$ -Präkursors sowie der Aufheizkonditionen nach dem Spincoaten. Die Atmosphäre ( $\text{N}_2$ ), die Dauer und der exakte Temperaturverlauf spielen dabei die entscheidenden Faktoren für die hier verwendete Schicht. Je optimierter diese Bedingungen, desto kompakter ist die Schicht und desto höher ist das Absorptionsvermögen der Schichten.

Eine wichtige Grundlage für effiziente Solarzellen stellen die Grenzschichten dar. Wir haben uns in Konstanz bewusst für  $\text{TiO}_2$  als Elektronentransportmaterial (ETM) entschieden, auch wenn dieses nicht die optimalen Ergebnisse liefert, wie das z.B. mit CdS der Fall ist. Uns war allerdings der Einsatz eines nicht-toxischen ETMs wichtiger, als der Wirkungsgrad. Als Lochleitendes Material (HTM) haben wir P3HT verwendet, was zu deutlich stabileren Zellen führt, als das mit dem meist verwendeten Spiro-OMeTAD der Fall ist. Allerdings ist auch hier der Wirkungsgrad nicht ganz so gut. D.h. hier ist noch weitere Optimierung notwendig, insbesondere, was den Einsatz von stabilen und ungiftigen Grenzschichten darstellt. Während in der Literatur einige der Zellen schon Wirkungsgrade von  $>10\%$  erreicht haben (z.B. Mo et al, <https://doi.org/10.1002/adfm.202420261>) ist uns dies in diesem Projekt noch nicht gelungen. Allerdings konnten wir mit dem Einsatz von ungiftigen und relativ haltbaren Materialien Wirkungsgrade von  $3\%$  erhalten. Wir sind überzeugt, dass der Wirkungsgrad auch mit ungiftigen Grenzschichten auf Werte von  $>10\%$  erreicht werden kann, allerdings hier noch weitere Optimierung bei den Grenzschichten notwendig ist.

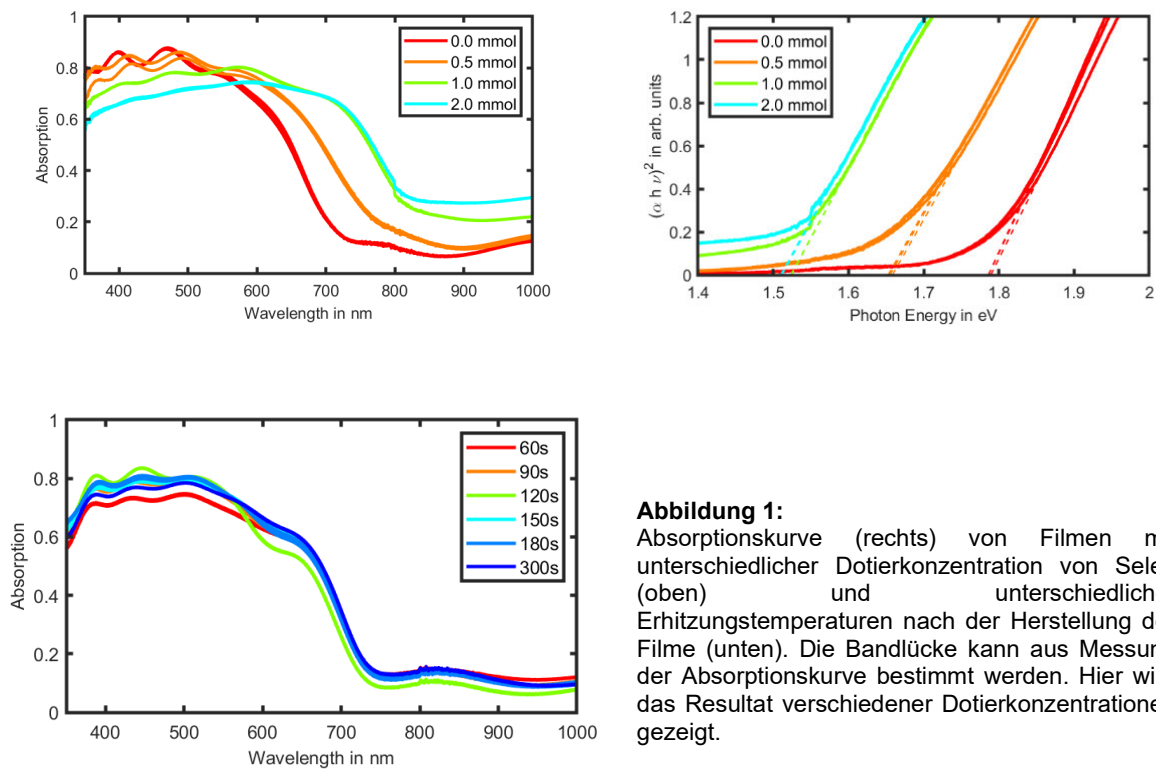
## Teil II: Eingehende Darstellung

Das Ziel dieses Projekts war es neue Dünnschichtsolarzellen basierend auf reichlich vorhandenen und ungiftigen Materialien mit großem Potenzial für hohe Effizienz und kostengünstige Produktion zu liefern. Als Material haben wir uns dafür  $Sb_2S_xSe_{3-x}$  herausgesucht, was schon vielversprechende Ergebnisse geliefert hat.

In dem Projekt wurden verschiedene Optimierungen durchgeführt. Im Folgenden werden hier die durchgeführten Arbeiten beschrieben:

Im Rahmen des Projektes wurde die Filmqualität von  $Sb_2S_3$  und  $Sb_2S_xSe_{3-x}$  Schichten untersucht. Zur Untersuchung der Schichten wurden folgende Methoden verwendet:

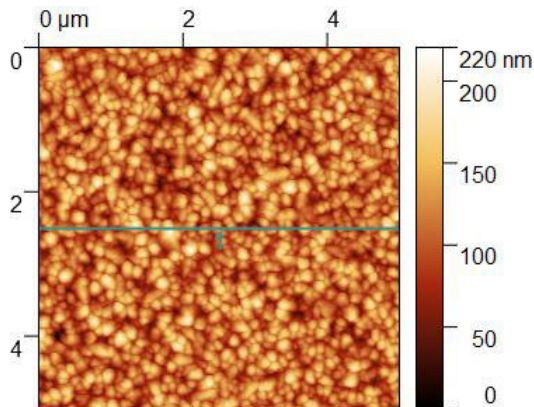
**UV-VIS-Absorption:** Diese Messung (s. Abb. 1) erlaubt Eindrücke über Absorptionsverhalten der Schichten bei unterschiedlichen Se-Dopierkonzentrationen. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist eine Veränderung der Bandlücke sichtbar. Unterschiedliche Spinparameter (Spingeschwindigkeit, Spinzeit, Erhitzungs-temperaturl, Atmosphärische Bedingungen, etc.) wurden untersucht und deren Einflüsse ausgewertet.



**Abbildung 1:** Absorptionskurve (rechts) von Filmen mit unterschiedlicher Dotierkonzentration von Selen und unterschiedlicher Erhitzungstemperaturen nach der Herstellung der Filme (unten). Die Bandlücke kann aus Messung der Absorptionskurve bestimmt werden. Hier wird das Resultat verschiedener Dotierkonzentrationen gezeigt.

Dabei wurde festgestellt, dass vergleichbares Verhalten der undotierten und dotierten Schichten vorliegt, wenn man von der veränderten Bandlücke und der damit verbundenen abweichenden Absorptionskante absieht.

**AFM** wurde zur Analyse der Oberfläche, vor allem Rauigkeit der Filme genutzt. Dabei wurde eine sehr raue Oberfläche festgestellt (im Bereich von 80 -100 nm, s. Abb. 2). Die Dicke der  $Sb_2S_xSe_{3-x}$  Schichten ist nicht homogen, was zu Problemen in der Reproduzierbarkeit führt.

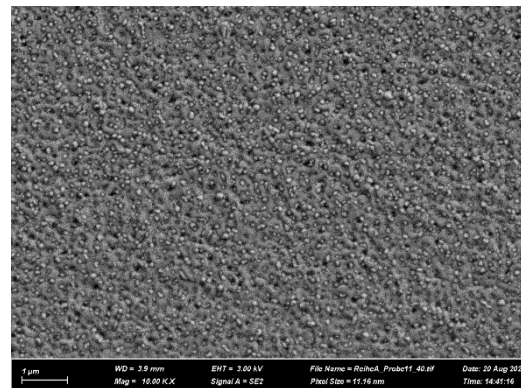
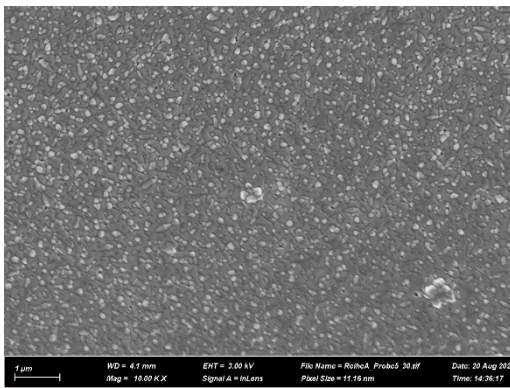


**Abbildung 2:**

AFM Aufnahme eines Filmes. Die Rauigkeit der Filme ist sehr hoch, was zu Problemen bei der Reproduzierbarkeit in Solarzellen führt.

Eine Möglichkeit hier Verbesserungen zu erreichen basiert auf der Variation der Herstellung des Elektronentransportmaterials (ETM) (z.B.  $\text{TiO}_2$ ).

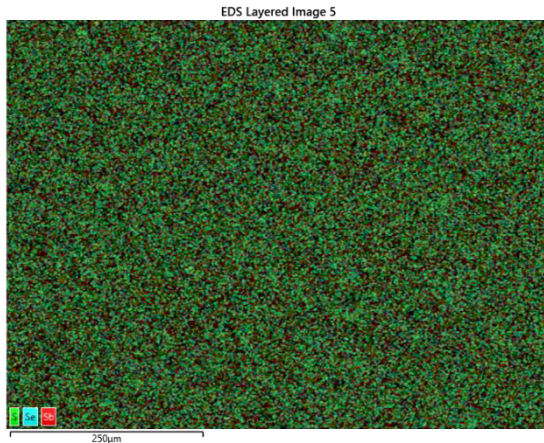
**Oberflächenanalyse mittels Elektronenmikroskopie:** SEM Abbildungen zeigen, dass die Filme Lücken aufweisen und nicht komplett geschlossen. Dies ist direkt mit der Rauigkeit der Filme verbunden. Dabei sehen undotierte und dotierte Filme nahezu identisch aus. Es sind keine strukturelle Veränderung aufgrund des Dotierens erkennbar (s. Abb. 3). Se scheint in den Kristall eingebaut zu werden und nicht zu segregieren.



**Abbildung 3:** SEM Aufnahmen von  $\text{Sb}_2\text{S}_x\text{Se}_{3-x}$  Filmen.

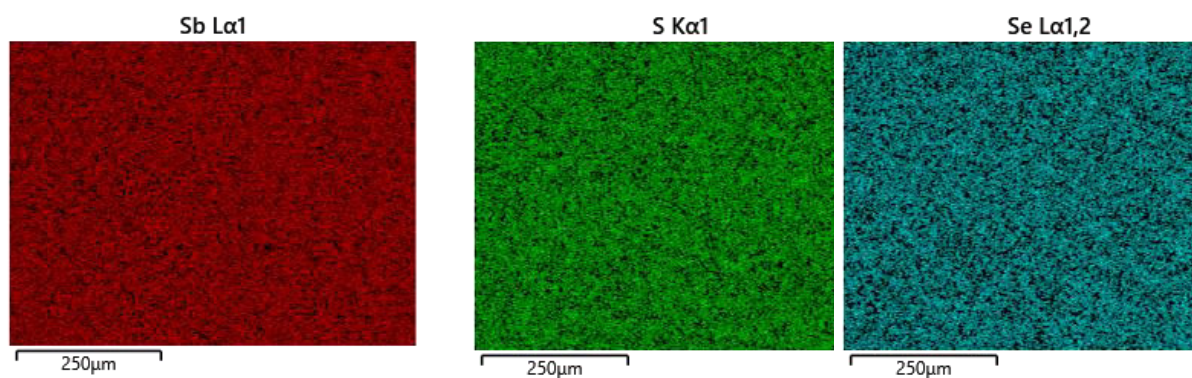
Es hat sich gezeigt, dass vor dem Erhitzen die Filme im SEM nur schwer abbildbar sind, da sich die Schichten zu schnell aufladen und ein scharfes Bild daher nicht möglich ist. Der Grund liegt darin, dass durch das Erhitzen der Film erst auskristallisiert und vorher in einem amorphen Film vorliegt, der nur sehr schlecht Ladungsabtransport ermöglicht.

EDX Analyse der Atomverteilung auf der Oberfläche der Schicht erlaubt die verschiedenen Anteile der Komponenten zu differenzieren. Dabei ist (s. Abb. 4) keine Clusterbildung erkennbar, alle unterschiedlichen Materialien scheinen relativ gleichmäßig verteilt zu sein, das gilt auch für das eingebrachte Se, was sich gleichmäßig in den Kristall einfügt.

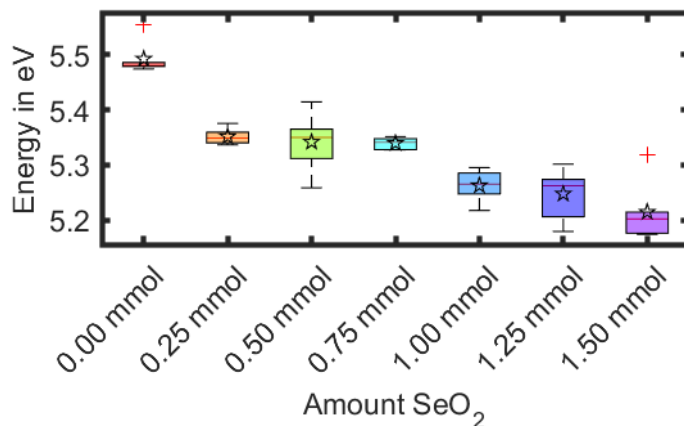


**Abbildung 4:**

EDX Analyse der verschiedenen Elemente. Die Elemente sind gleichmäßig verteilt und ein Clustern ist nicht festzustellen. Dies gilt auch für das Dotieratom Se (unten rechts).



Eine weitere Messung ist **Fotoelektronenspektroskopie an Luft (PESA)**: Hier kann der Einfluss des Se-Dotierens in der Änderung der Lage des Ionisationsenergielevels bestimmt werden (s. Abb. 5)



**Abbildung 5:**

Resultat der PESA Messung der verschiedenen Dotierungen

Die Filmqualität (und somit auch die Effizienz der daraus resultierenden Solarzellen) konnte signifikant verbessert werden. Hauptverantwortlich für eine verbesserte Filmqualität war das optimieren des Syntheseprozesses des  $Sb_2S_xSe_{3-x}$ -Precursors sowie der Ausheizbedingungen. Die Atmosphäre ( $N_2$ ), die Dauer und der exakte Temperaturverlauf sind dabei die entscheidenden Faktoren für die die Qualität der Schicht. Je besser die Bedingungen, desto kompakter ist die Schicht und desto höher ist das Absorptionsvermögen der Schichten. Die Filmqualität konnte auch über das Anpassen der Spinparameter (Spingeschwindigkeit, Spinzeit, Spinatmosphäre) verbessert werden, (Ergebnisse am deutlichsten im UV-VIS erkennbar).

Die Effizienz der in Konstanz hergestellten Solarzellen kann sich nicht mit den Rekordhaltern messen. Diese liegen derzeit bei  $> 10\%$ <sup>1</sup>. Das liegt unter anderem daran, dass von uns als ETM  $\text{TiO}_2$  gewählt wurde, das nicht optimal für höchste Effizienzen ist. Die Wahl dieses Material liegt darin begründet, dass das momentan beste ETM (CdS) hochgradig giftig ist. Somit beraubt man  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Solarzellen einer der Vorteile, die es gegenüber anderen Solarzellenkonzepten (z.B.: Perovskit-Solarzellen) hat. Daher haben wir uns bewusst für das ungiftige  $\text{TiO}_2$  entschieden, mit dem man auch vielversprechende Solarzellenperformances erhalten kann.

Auch bei dem HTM (Lochleitendes Material) haben wir nicht das etablierte und bisher erfolgreichste Material spiro-OMeTAD verwendet. Der Grund liegt in diesem Fall darin, dass spiro-OMeTAD eine schlechtere Langlebigkeit aufweist als das von uns verwendete P3HT. Stabilität ist ein weiterer Vorteil von  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Schichten und sollten daher mit stabilen Schichten kombiniert werden.

Auch haben wir in diesem Projekt bewusst Herstellungsverfahren gewählt, die auch aufskalierbar sind. Daher wurde ein aus Lösung-prozessierter Film hergestellt, der in unserem Fall gespincoated wurde, aber wo auch eine Herstellung durch eine Druck- bzw. Coating Methode durchaus denkbar ist. Die derzeit in der Literatur mit den besten Resultaten erhaltenen Solarzellen basieren auf der hydrothermalen Herstellungsmethode. In dem Projekt konnte aber eine signifikante Verbesserung der Effizienz erreicht werden, bei der ausschließlich stabilere und nicht-toxische Materialien zum Einsatz kamen.

Für die Herstellung von lösungsbasierten  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Solarzellen wurde die Synthese nach dem Rezept aus nach Wu et al. verwendet. Wu et al.<sup>2</sup>.

Als ETM wird eine 56 nm dicke  $\text{TiO}_2$  Schicht verwendet, die mittels des Verfahrens des Sputterns hergestellt wurde. Die  $\text{TiO}_2$  Schicht wird im Anschluss für 15 min bei  $450^\circ\text{C}$  erhitzt.

Die  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Schicht wurde mittels der Spincoating Methode aufgebracht. Die Spin Parameter betragen 8000 rpm für 90 s bei dynamischen Spincoating (Auftragung der Lösung während das Substrat schon rotiert). Im Anschluss wird die Probe für eine Minute auf eine Heizplatte bei  $140^\circ\text{C}$  gelegt und danach in eine Glovebox mit  $\text{N}_2$ -Atmosphäre transferiert. Dort wird die Probe auf  $240^\circ\text{C}$  hochgeheizt und bei dieser Temperatur für 2h gehalten. Dies sorgt für die gleichmäßigste Kristallisation und die besten Absorptionseigenschaften. Anschließend wird die Temperatur auf  $320^\circ\text{C}$  hochgefahren und die Probe bei dieser Temperatur für 5 min erhitzt. Im Anschluss wird die P3HT als HTM Schicht aufgebracht. Hierfür wird 10 mg P3HT in 1 ml Chlorbenzol gelöst und mittels Spincoating bei 1500 rpm aufgebracht.

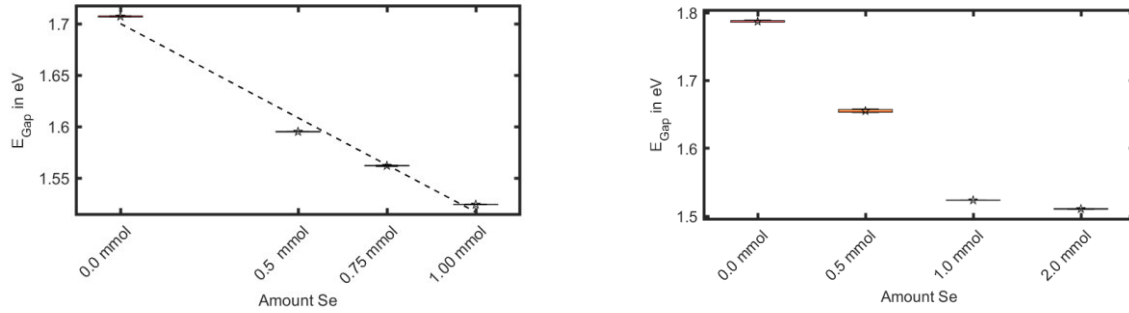
Zum Abschluss wird als top-Elektrode 130 nm Silber aufgedampft.

Durch das Dotieren mit Se in dem Syntheseprozess kann die Bandlücke von  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  von ungefähr 1,7 – 1,8 eV auf bis zu 1,52 eV für  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  abgesenkt. Damit liegt die Bandlücke von  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  näher an der theoretisch optimalen Bandlücke nach dem Shockley-Queisser Limit, das sein Maximum bei ca. 1,34 eV hat. Weiteres Erhöhen der Se Konzentration in der Lösungsvorstufe verschiebt die Bandlücke dann nicht weiter, da das Se sich bei zu hohen Konzentrationen nicht mehr löst und abfiltriert werden muss.

---

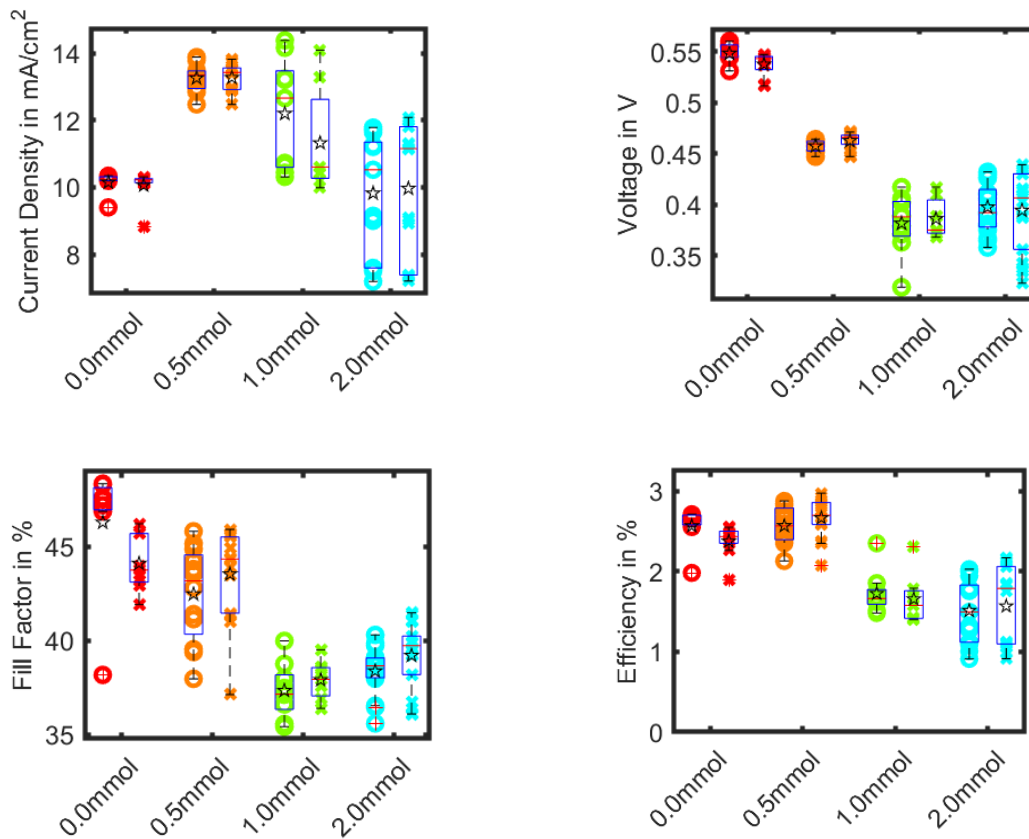
<sup>1</sup> Mo et. al, Adv. Funct. Mater. (2025) 2420261, <https://doi.org/10.1002/adfm.202420261>

<sup>2</sup> Wu et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 183 (2018) 52–58, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.04.009>



**Abbildung 7:** Bandlücke in Abhängigkeit der Se-Konzentration in der Präkusoren-Lösung für die Herstellung der  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Filme.

Obwohl das Se Doping einen klaren Einfluss auf das Absorptionsverhalten hat, ist der Einfluss auf die Solarzellenperformance nicht so eindeutig. Das erhöhte Absorptionsverhalten hat nur einen geringfügigen Einfluss auf den Wirkungsgrad, da sich die erhöhte Kurzschlussstromdichte  $J_{\text{SC}}$  mit der reduzierten Leerlaufspannung  $V_{\text{OC}}$  nahezu ausgleicht. Durch eine Optimierung der Schichtdicke könnte dies verbessert werden. Andere Parameter wie die Spingeschwindigkeit, Annealing Bedingungen und Atmosphäre während des Spin-coatings haben einen größeren Einfluss auf die Effizienz der Solarzellen. Auch die Wahl der Ladungstransportierenden Materialien hat einen großen Einfluss auf die Solarzellen.  $\text{NiO}_x$  kann in Zukunft zum Beispiel statt P3HT/Spio-OMeTAD für eine höhere Stabilität verwendet werden.



**Abbildung 8:** Solarzellenperformance der  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Filme mit unterschiedlichen Se-Anteilen in der Präkusoren-Lösung.

Die Materialien der Kontakte scheinen nicht der limitierende Faktor für die Effizienz der Solarzellen zu sein. Gold wird in den besten Solarzellen benutzt, aber Silber scheint keine signifikant schlechteren Ergebnisse zu liefern.

Für das elektrontransportierende Material wird in der Literatur für die besten Zellen immer eine Schicht aus CdS verwendet. Diese ist aber hoch giftig und nimmt  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Zellen somit einen der Vorteile gegenüber Konkurrenzmaterialien.  $\text{TiO}_2$  kann auch gute Ergebnisse liefern (wenn auch bisher keine Rekordwirkungsgrade) und ist gleichzeitig ungiftig, daher haben wir uns für dessen Verwendung entschieden.

Als Lochtransportierende Schicht (HTM) wird fast immer spiro-OMeTAD verwendet. Dieses ist jedoch nicht sonderlich stabil, zumal es auch mit Zusätzen wie tBP und Li-Salz versehen werden muss, um zu hocheffizienten Zellen zu führen. Dies hat aber negative Effekte in Bezug auf die Langzeitstabilität. Daher verwenden wir als Alternative derzeit P3HT. Für eine noch bessere Stabilität werden wir in Zukunft  $\text{NiO}_x$  als HTM untersuchen, was bei Solarzellen schon sehr vielversprechende Ergebnisse erzielt hat.

Wie der Abb. 8 zu entnehmen ist, zeigen unsere Zellen Wirkungsgrade von bis zu 3%. Dies ist noch deutlich unter den in der Literatur präsentierten Daten mit  $>10\%$  Wirkungsgrad. Allerdings beruht das zu einem großen Teil auf den bzgl. der Performance nicht idealen Grenzschichten zum  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$ . Hier sehen wir in Zukunft noch Potenzial für deutliche Verbesserungen. Insbesondere, neue Materialien, die Stabilität mit hoher Effizienz verbinden müssen noch gefunden bzw. an das  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  angepasst werden.

Bisher zeigen die lösungsprozessierten  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  für Solarzellen deutliche Vorteile, da sie deutlich glatter sind, als die durch CMBD abgeschiedenen Schichten. Es scheint aber auch hier noch Möglichkeiten zu geben, die Filmherstellung dahingehend zu optimieren, dass deren Rauigkeit deutlich reduziert wird, so dass auch als Absorberschicht geeignet sind. Dies müssen weitere Tests zeigen. Der Vorteil der CMBD-Schichten ist, dass die Se-Konzentration nicht von der Se Löslichkeit begrenzt ist und hier daher ggf. auch höhere Dotierungen in Frage kommen. Allerdings wurden bisher auch nur die üblichen Lösungsmittel verwendet, so dass ggf. auch andere Lösungsmittel bzw. Lösungsmittelmischungen für hochqualitative Filme gefunden werden können.

Ideal als Absorberschicht wäre eine  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Schicht, in der das Verhältnis zwischen Schwefel und Selenium so angepasst wurde, dass die Bandlücke bei 1,34 eV liegt. Dies würde nach dem Shockley Queisser Limit die besten Effizienten liefern. Momentan können wir die Bandlücke zwischen 1,8 eV und 1,5 eV variieren.

In den letzten Jahren wurden in der Forschung an  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  Zellen einige Fortschritte erzielt. Wirkungsgrade über 10% konnten erreicht werden<sup>3</sup>. Allerdings muss hier eingeschränkt werden, dass CdS als übliche ETM Schicht verwendet wurde und damit ein toxisches Schwermetall zum Einsatz gekommen ist. Gleichzeitig kann aber beobachtet werden, dass in Solarzellen mit hohen Wirkungsgrade auch eine Passivierung von Defekten eine ganz entscheidende Rolle spielt. In dem Beispiel der  $>10\%$  Zelle wurde z.B. Cu als Dotieratom insbesondere für den CdS Film verwendet und hat hier Ladungsträgerkonzentration der Elektronen deutlich erhöht und auch zu einer höheren Transparenz der CdS Filme geführt. Mit 2-Terminal Tandem Solarzellen aus  $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Sb}_2\text{S}_3$  konnten sogar 14% Wirkungsgrad erzielt werden<sup>4</sup>. Diese Ergebnisse zeigen zum einen, dass das Material wirklich das Potenzial für effiziente Solarzellen hat, aber auch, dass noch einiges an Forschung notwendig ist, um nicht nur die Effizienz zu steigern, sondern die Solarzellen auch mit ungiftigen und stabilen Materialien herzustellen zu können. Unsere Forschung hat dazu einen Beitrag geleistet.

Planungen für die Zukunft:

Derzeit evaluieren wir, welches Funding für Nachfolge Projekte in Frage kommt. Wir sehen weiterhin großes Potenzial in dieser Forschungsrichtung. Allerdings ist weiterhin noch Grundlagenforschung auf dem Gebiet notwendig. Derzeit eruieren wir, ob es zusammen mit weiteren Partner als EU Projekt in Frage kommt.

---

<sup>3</sup> Mo et. al, Adv. Funct. Mater. (2025) 2420261, <https://doi.org/10.1002/adfm.202420261>

<sup>4</sup> Shrivastav, Phys. Scr. 98 (2023) 115110, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad000e>

Publikationen aus dem Projekt:

- T. Mayer et al., Towards non-toxic efficient  $\text{Sb}_2\text{S}_3\text{Se}_{3-x}$  solar cells, to be published
- T.M. Razykov et al., Growth and characterization of  $\text{Sb}_2(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  thin films prepared by chemical-molecular beam deposition for solar cell applications, Thin Solid Films 807 (2024), 140554, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140554>
- T.M. Razykov et al., Effect of substrate temperature on the microstructural and optical properties of chemical molecular beam deposited  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  films, J. Mater Sci: Mater Electron (2024), 35:2295, <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13999-y>
- T.M. Razykov et al., Effect of substrate temperature on the performance of  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  thin film solar cells fabricated by chemical-molecular beam deposition method, Thin Solid Films 808 (2024), 140565, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140565>