

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Arbeitsgruppe für Integrierte Systeme und Photonik
Prof. Dr. Martina Gerken



ISP

Abschlussbericht Promotionsvorhaben

**Nanostrukturierte Solarzellen zur Integration in
Zweifachverglasung**

vorgelegt von

Jan Schardt

Kiel, 30.09.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Funktionsweise organischer Photovoltaik	1
1.2	Stand der Technik	3
2	Forschungsergebnisse	4
2.1	Teiltransparente Solarzellen	4
2.2	Nanostrukturen in organischer Photovoltaik	7
3	Fazit und Ausblick	11
	Literaturverzeichnis	13
	Abbildungsverzeichnis	15
	Tabellenverzeichnis	16

Kapitel 1

Einführung

Dieser Bericht umfasst die Arbeit der letzten drei Jahre, wobei die zeitliche Reihenfolge nicht zwangsläufig der hier behandelten Themen entspricht. Für die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse sind oft Schritte nötig gewesen, um zum Ergebnis zu gelangen, welche in diesem Bericht nicht explizit behandelt werden.

Neben der Forschung am Thema wurde zudem Öffentlichkeitsarbeit betrieben, um das Projekt und die Förderung der EKSH vorzustellen. Im Zuge dessen nahm ich am International Summit on Organic and Hybrid Photovoltaics Stability (ISOS) teil. Die Konferenz wurde im Jahr 2019 am Karlsruher Institute of Technology (KIT) ausgerichtet. Zudem hatte ich die Möglichkeit meine Forschungsarbeit auf dem Future Energies Science Match 2018 und auf der Hannovermesse 2018-2019 vorzustellen.

1.1 Funktionsweise organischer Photovoltaik

Eine Solarzelle besteht im einfachsten Fall aus einem photoaktiven Material, der sogenannten Aktivschicht, zwischen zwei leitfähigen Materialien, welche Anode und Kathode genannt werden. Ein Querschnitt einer Solarzelle ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Durch die Absorption des einfallender Photonen entsteht elektrisch nutzbare Energie, wobei es wichtig ist, dass zumindest eine der Elektroden lichtdurchlässig ist.

Bei der Absorption eines Photons entsteht ein Elektron-Loch-Paar, ein sogenanntes Exzi-

ton, welches zum Stromfluss beiträgt, sofern die Ladungsträger getrennt werden und zu den jeweiligen Elektroden gelangen. Die Diffusionslänge von Exzitonen beträgt wenige Nanometer, weshalb in organischen Solarzellen häufig das Donator-Akzeptor-Prinzip zum Tragen kommt. Dabei handelt es sich um eine Mischung zweier Halbleiter, von denen das Donatormaterial Elektronen an das Akzeptormaterial abgeben möchte. Durch die Vermischung der Materialien innerhalb einer Schicht entstehen viele Grenzflächen, was den Transport der Ladungen durch die Aktivschicht verbessert.

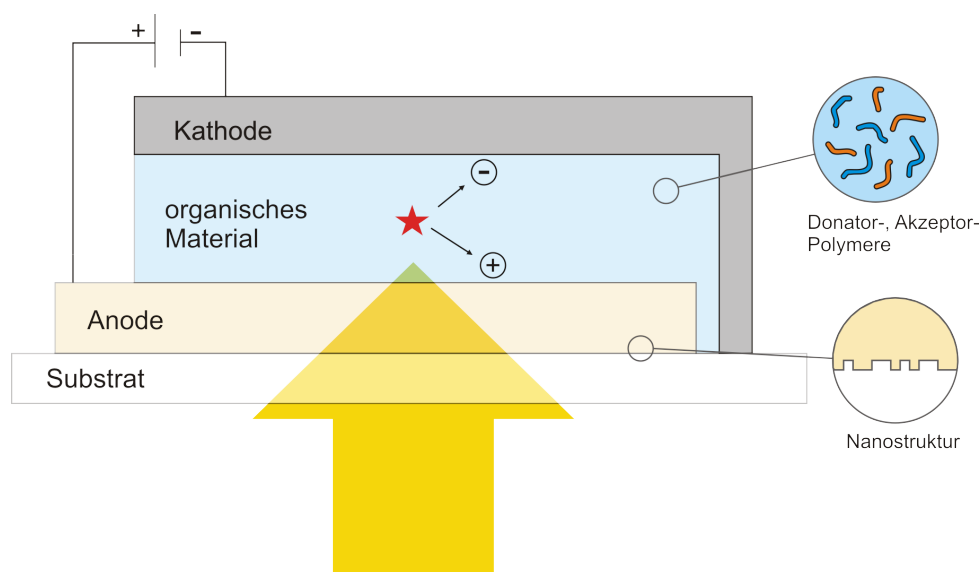


Abbildung 1.1 – Schematische Darstellung einer organischen Solarzelle im Querschnitt; Einfallendes Licht tranmittiert durch die Anode und erzeugt durch Absorption ein Exziton (roter Stern) in der aktiven Schicht; Die Ladungsträger werden über das Donator-Akzeptor-System getrennt und tragen zum Stromfluss bei; Donator-, Akzeptormoleküle sowie die Nanostruktur sind in den Vergrößerungen schematisch dargestellt.

Bisherige Forschungen [7, 8, 9, 10] haben zudem gezeigt, dass sich durch das gezielte Einbringen von Nanostrukturen in einer Solarzelle die Lichtenergie effizienter nutzen lässt. Durch die periodische Struktur unter der Anode (siehe Abbildung 1.1) können bestimmte Teile des Lichts in die aktive Schicht einkoppeln, wodurch die Energiekonzentration im absorbierenden Material erhöht wird. Diese Erhöhung bewirkt, dass effektiv mehr Photonen Exzitone erzeugen können anstatt reflektiert oder transmittiert zu werden. Die Struktur wird auf dem Substrat aufgebracht und der klassische Aufbau sämtlicher Schichten darauf prozessiert. Dies ist notwendig, da die Struktur auf der lichteinfallenden Seite und der

transparenten Elektrode liegt, sodass der Einkopplungseffekt sichtbar wird. Möglich ist es durch den Unterschied des Brechungsindex zwischen Luft und der Elektrode, wodurch beispielsweise Indiumzinnoxid als Wellenleiter funktioniert und bestimmte Wellenlängen führen kann.

1.2 Stand der Technik

Die Möglichkeit zur Nutzung organischer Materialien in Solarzellen wurde erstmal 1967 von A. Golubovic veröffentlicht [1]. Darauf folgend wurde ein Farbstoff in einer organischen Solarzelle 1976 im Applied Physics Letters verwendet [2] und 1978 erstmals eine organische Solarzelle mit einer Effizienz von 1% veröffentlicht [3]. Im Vergleich zu anderen Solarzellentypen, beispielsweise der Silizium- oder Dünnschicht-Solarzellen, begann die intensive Forschung an organischen Verbindungen zur Erzeugung von Strom relativ spät. Anfang der 90er-Jahre wurden Effizienzen von $\approx 6\%$ mithilfe von Farbstoffen in Solarzellen erreicht und die Tendenz ist seitdem steigend. Mit $\approx 2,5\%$ Effizienz wurden 2001 rein organische Plastiksolarzellen hergestellt [4]. Der Effizienzrekord von 19.6% wurde zuletzt im August 2021 mit einer organischen Tandemsolarzelle erreicht [5].

Die organische Photovoltaik bietet dabei besondere Vorteile gegenüber der klassischen Silizium-Solarzelle. Flexibilität, Teiltransparenz, geringere Kosten und Gewicht mit der Tauglichkeit zur Massenproduktion sind nur einige der Vorteile, welche die Materialien mit sich bringen. Besonders betrachtet wird in dieser Arbeit die Teiltransparenz. Durch die Nutzung sehr dünner Schichten kann der Gesamtaufbau - in Kombination mit den richtigen Elektrodenmaterialien - semitransparent realisiert werden, was den Einsatzbereich deutlich erweitern würde. Als transparente Elektrodenmaterialien kommen üblicherweise PEDOT:PSS und Indiumzinnoxid zum Einsatz. 2014 wurde eine funktionierende teiltransparente Solarzelle mit einer Effizienz von 2,3% und 2% je nach Einfallsrichtung des Lichts vorgestellt [6].

Kapitel 2

Forschungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Zuge des Promotionsvorhaben erzielten Forschungsergebnisse dargestellt und diskutiert. Die Schwerpunkte der Forschung sind dabei die Herstellung und Charakterisierung von teiltransparenten Polymersolarzellen, sowie die Simulation und Herstellung nanostrukturierter Solarzellen.

2.1 Teiltransparente Solarzellen

Die Forschung an teiltransparenten Solarzellen beinhaltete die Suche nach geeigneten Materialien für die Aktivschicht und die Top-Elektrode. Als Anodenmaterialien wurden verschiedene kommerziell erhältliche Polymerverbindungen (PEDOT:PSS), gelöst in Wasser, zur Flüssigprozessierung untersucht und mit einer dünnen Silberschicht verglichen. Die Silberschicht und dazugehörige Lochtransport- und Deckschicht aus Molybdäntrioxid (MoO_3) sind je 10 nm dick thermisch auf der Aktivschicht aufgetragen. Die thermische Verdampfung erlaubt Schichtdicken, weit dünner, als es mit Flüssigprozessierung möglich ist, wodurch gut leitende Materialien wie Silber verwendet werden können, der Gesamtstack jedoch teiltransparent bleibt.

Zur qualitativen Auswertung wird die Effizienz und Transparenz der Solarzelle betrachtet. Die Effizienz wird mit der Photo-Conversion-Efficiency (engl. PCE) bemessen, welche ein Verhältnis der erzeugten Elektronen zur Gesamtmenge der eingestrahnten Photonen ist.

Effizienzen von $\text{PCE}_{\text{PEDOT:PSS-FHC}} \approx 1.66\%$, sowie $\text{PCE}_{\text{Ag}} \approx 1.54\%$ konnten mit diesen Materialien erreicht werden.

Der Fokus lag nun darauf, bestehende Prozesse zu optimieren und weitere Materialien zu testen, um die Gesamteffizienz zu erhöhen. Dafür wurden die Schichtdicken der Elektroden und die Parameter bei der Herstellung variiert. Nach wie vor stand im Mittelpunkt der ideale Tradeoff zwischen der Leitfähigkeit und der Transparenz des Materials bei dünnen Schichten. Sämtlichen Experimenten lag der gleiche Aufbau der Solarzelle zugrunde. Verwendet wird eine Kathode aus Indiumzinnoxid (ITO), Zinkoxid Nanopartikel als Elektronentransportschicht und eine Aktivschicht aus einem Donor-Akzeptor-Gemisch aus P3HT und PCBM, gelöst in Dichlorbenzol. Dieser Aufbau wurde bereits optimiert und reproduzierbare Bauteile können hergestellt werden, sodass der Einfluss der unterschiedlichen Anodenmaterialien messbar ist.

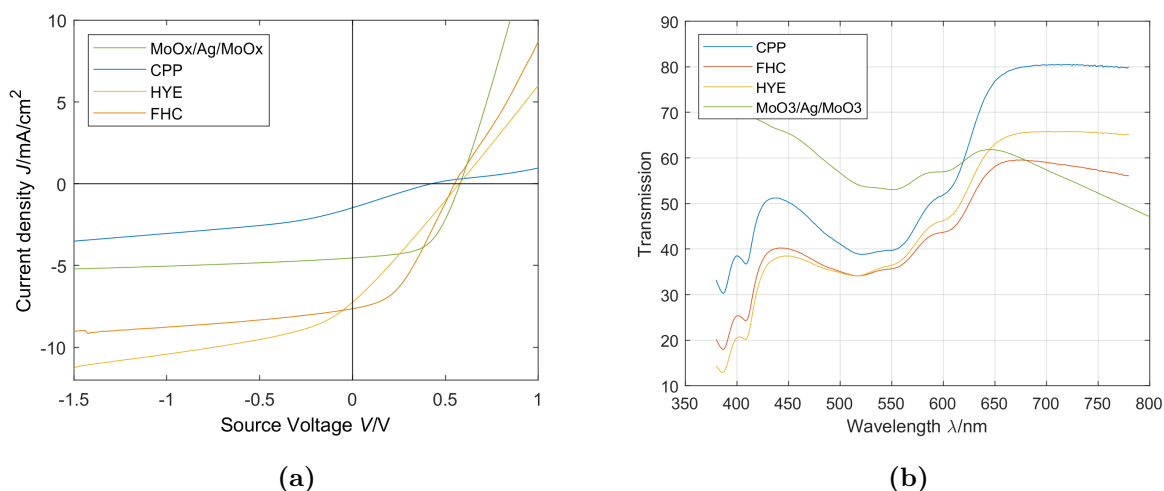


Abbildung 2.1 – UI-Kennlinien (a) und Transmissionspektren (b) organischer Solarzellen mit unterschiedlichen Top-Elektrodenmaterialien.

Untersucht wurden drei kommerzielle PEDOT:PSS von *Clevios*: CPP PEDOT:PSS (CPP), HY-E: Ag-PEDOT:PSS (HYE) und FHC Solar (FHC). HYE ist eine wasserbasierte Polymerlösung mit Silbernanodrähten, welche hohe Leitfähigkeit bei geringer Schichtdicke verspricht. CPP ist das am weitesten verbreitete PEDOT:PSS und wird seit vielen Jahren in der Wissenschaft und Industrie eingesetzt. Der Nachteil beider Materialien besteht darin, dass eine zusätzliche Lochtransportschicht vorher aufgetragen werden muss, um die

Ladungsträger effektiv aus dem Aktivmaterial zu extrahieren. FHC hingegen ist eine neue Zusammensetzung von Polymeren, welche gleichzeitig als Lochtransportschicht dient, die Herstellung somit um einen Schritt erleichtert.

Die UI-Kennlinien und Transmissionsspektren sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Anhand dieser UI-Kennlinien kann die Effizienz berechnet werden; je größer die Fläche unter der Kurve zwischen dem Schnittpunkt mit der y-Achse, der Kurzschlussstromdichte J_{SC} , und der x-Achse, der Leerlaufspannung V_{OC} , desto höher die Effizienz. Diese Fläche wird mit dem Füllfaktor (FF) beschrieben. Die Transparenz T der Solarzellen kann aus dem Transmissionsspektrum berechnet werden. Die gemessenen und errechneten Werten sind Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Anodenmaterial	$J_{SC}/\frac{mA}{cm^2}$	V_{OC}/V	FF	PCE/%	$T/\%$
HYE	7.17	0.59	0.26	1.23	46.83
CPP	1.72	0.42	0.24	0.17	57.71
FHC	7.73	0.55	0.39	1.66	44.55
MoO ₃ /Ag/MoO ₃	4.54	0.58	0.56	1.54	41.51

Tabelle 2.1 – Charakteristische Werte der hergestellten Solarzellen mit verschiedenen Top-Elektroden.

Gut zu erkennen ist, dass CPP weit abgeschlagen die schlechteste Effizienz aufweist und auch bei der Herstellung war die Reproduzierbarkeit der Kennlinien problematisch. Die anderen drei Materialkombinationen lassen sich gut reproduzieren und die exemplarisch dargestellten Kurven entsprechen dem Mittel aller Zellen. Die Kennlinie der HYE-Anode hat einen hohen resistiven Anteil, was an der vergleichsweise hohen Steigung bei geringer Spannung der Kurve erkennbar ist. Durch diese Charakteristik ergibt sich ein sehr geringer Füllfaktor, ähnlich dem CPP, resultierend in geringer Effizienz. Sowohl die FHC-Anode, als auch die aufgedampfte Alternative, zeigen deutlich besseres Diodenverhalten, was sich ebenfalls im Füllfaktor widerspiegelt. Mit einer Effizienz von 1.66% sind deutliche Verbesserungen bei der Flüssigprozessierung erzielt worden, während die im Vorjahr optimierte thermisch verdampfte Elektrode unverändertes Verhalten zeigt und bezüglich

der Effizienz und Prozesskomplexität den direkten Vergleich verliert. Die Transmission der Solarzellen unterscheidet sich minimal und mit $\approx 40\%$ ist sie ausreichend hoch ($> 20\%$), sodass sie für das menschliche Auge durchsichtig wirkt. Die CPP-Anode hat eine deutlich höhere Transmission, ist durch die geringe Effizienz aber unbrauchbar.

2.2 Nanostrukturen in organischer Photovoltaik

Zunächst werden Simulationen betrachtet. Dafür ist der Schichtstapel der organischen Solarzelle in *Comsol* nachgebildet worden. Mithilfe der Finite Elemente Methode (FEM) werden die Wellengleichungen im zweidimensionalen Raum gelöst. Aus den Lösungen dieser Gleichung lässt sich die Feldverteilung in jedem Punkt berechnen. Durch Integration dieser über die zu betrachtenden Flächen ergibt sich beispielsweise die wellenlängenabhängige Gesamtabsorption innerhalb der Aktivschicht. Diese ist für die folgenden Ergebnisse zentral, da der Einfluss von Nanostrukturen auf die Absorption untersucht werden. In Abbildung 2.2 sind zwei exemplarische Feldverteilungen bei der Resonanzwellenlänge verdeutlicht.

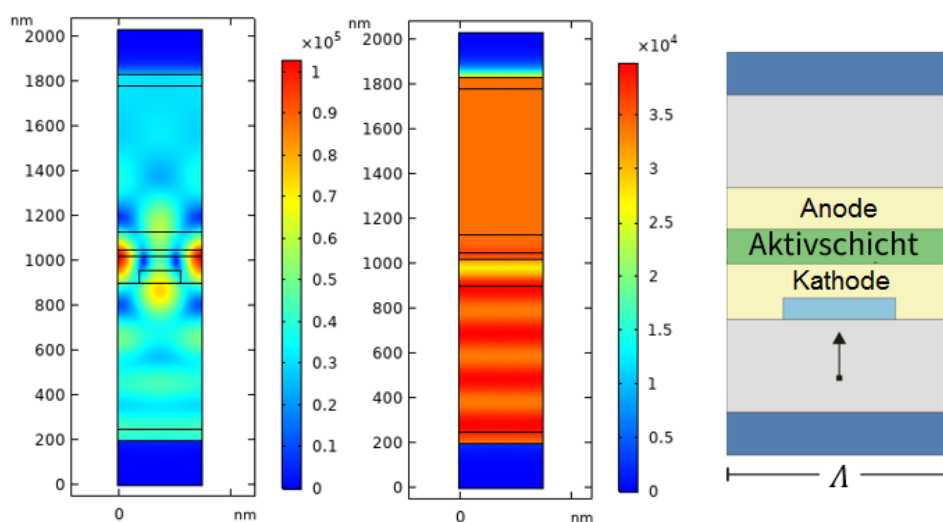


Abbildung 2.2 – Simulation der Verteilung des elektrischen Feldes in einer organischen Solarzelle mit (links) und ohne (mittig) Nanostruktur. (links) Schematischer Schichtaufbau für die Simulation. Aktivschicht zwischen den Elektroden mit der Gitterstruktur (hier hellblau) unter der Kathode; das elektrische Feld zur Anregung wird von unten eingebracht (Pfeil).

Links ist eine Solarzelle mit Nanostruktur zu sehen, während rechts eine planare Referenz abgebildet ist. Gut erkennbar ist die starke Felderhöhung im Aktivmaterial bei eingebrachter Nanostruktur, während das Feld in der rechten Grafik gleichmäßig verteilt ist. Durch den direkten Vergleich lässt sich die relative Absorptionserhöhung durch das Gitter errechnen und wird folglich in Prozent angegeben.

Simulationen zeigen, dass für das Polymergemisch P3HT:PCBM kaum nennenswerte Absorptionserhöhungen erzielt werden können ($< 1\%$). P3HT:PCBM ist weit verbreitet in der organischen Photovoltaik, was sich unter anderem durch die von Haus aus hohe Absorption der Materialien äußert. Die Simulationen zeigen, dass eine Erhöhung der bereits hohen Absorption mittels Gitter problematisch ist. In Abbildung 2.3a ist erkennbar, dass die Erhöhung verglichen mit der mittleren Absorption verschwindend klein ist.

Abhilfe können schmalbandig absorbierende Materialien schaffen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass nur ein sehr kleiner Teil des sichtbaren Lichts absorbiert wird und die Gesamtabsorption vergleichsweise klein ist. Der Einfluss von Gitterstrukturen sollte somit präziser sein. Für die Simulation und Herstellung wurde auf eine Bulk-Heterojunction aus AlPcCl und C60 zurückgegriffen. Die Absorptionscharakteristik mit und ohne Gitter sind in Abbildung 2.3b zu sehen.

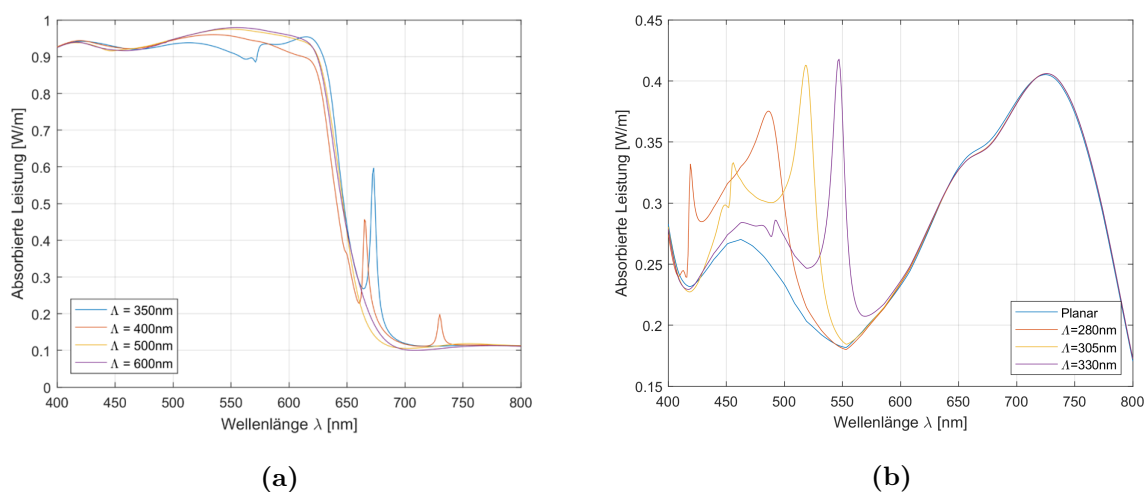


Abbildung 2.3 – Absorbierte Leistung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Gitterperioden mit P3HT:PCBM (a) und AlPcCl (b) als Aktivmaterial.

Die Simulationen des schmalbandigen Absorbermaterials zeigen vielversprechende Verbes-

serung der Absorption (7%), verglichen mit Ergebnissen mit herkömmlichen Breitbandabsorbern.

Im Anschluss sollen die Simulationsergebnisse mit Messwerten verglichen werden. Dazu wurden die Nanostrukturen mittel Nanoimprintlithografie in den Schichtaufbau integriert. Ein Photoresistlack wird auf der Kathode ITO aufgetragen und mit einem Stempel wird die Gitterstruktur in den Lack übertragen, welcher unter UV-Belichtung aushärtet. Anschließend wird die Gitterstruktur mithilfe eines Ionenstrahlätzers in das ITO übertragen. Dabei wird mit dem Ionenstrahl die Nanostruktur gleichmäßig abgetragen und in das ITO geätzt. Im nächsten Schritt werden die Elektrontransport-, Aktiv- und Löchertransportschicht, sowie die Anode thermisch aufgedampft. Final wird die Solarzelle verkapselt, sodass sie vor Eindringen von Sauerstoff geschützt ist. Die vollständige, teiltransparente Solarzelle ist in Abbildung 2.5b zu sehen.

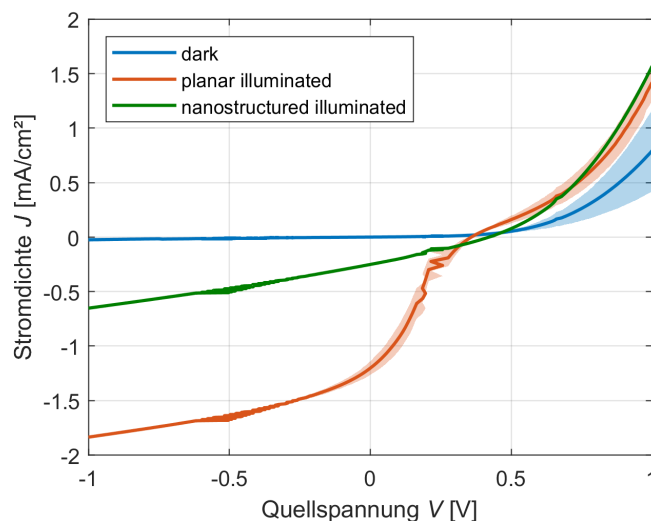


Abbildung 2.4 – Strom-Spannungs-Kennlinie von AlPcCl-OPV; Dunkelstrom (blau), Photostrom der planaren Referenz (rot) und Photostrom der nanostrukturierten Solarzelle (grün) sind über der Spannung aufgetragen.

In Abbildung 2.4 sind die Strom-Spannungs-Kennlinien von nanostrukturierten (grün) und planaren (rot) Solarzellen dargestellt. Die blaue Kurve zeigt das Verhalten ohne Beleuchtung. Die transparenten farblichen Bereiche zeigen die Standardabweichung aller vermessenen Proben. Zu sehen ist, dass sich die Kennlinien stark unterscheiden und besonders die planare Zelle eine ausgeprägte S-Charakteristik aufweist, während die strukturierte

Zelle von seriellen Widerständen dominiert ist. Die Effizienz beider Varianten unterscheidet sich allerdings kaum und liegt bei $\approx 0.4\%$. Deutlich wird es, wenn man die Kurven zwischen $0 - 0.4\text{ V}$ ansieht. Der optimale Arbeitspunkt beider Solarzellen liegt etwa bei $0.2 - 0.3\text{ V}$.

Da der Einfluss der Nanostruktur elektrisch nur schwer nachzuweisen ist, wurde die Solarzelle optisch vermessen, da die Resonanzwellenlänge der Gitterstruktur stark winkelabhängig ist. Interferenzmuster, vergleichbar mit derer einer CD-ROM, sind mit dem bloßen Auge sichtbar, wie in Abbildung 2.5b zu sehen. Die Solarzelle wird mit einer breitbandigen Lichtquelle unter verschiedenen Winkeln bestrahlt und das Transmissionsspektrum währenddessen ausgewertet. Das auf das Anregelicht normalisierte Transmissionsspektrum ist in Abbildung 2.5a gezeigt. In Resonanz ist die Transmission geringer, da diese Wellenlängen in das Aktivmaterial eingekoppelt sind. So bildet das dunkle Kreuz die Verschiebung der Resonanzwellenlänge über dem Einfallswinkel exakt ab.

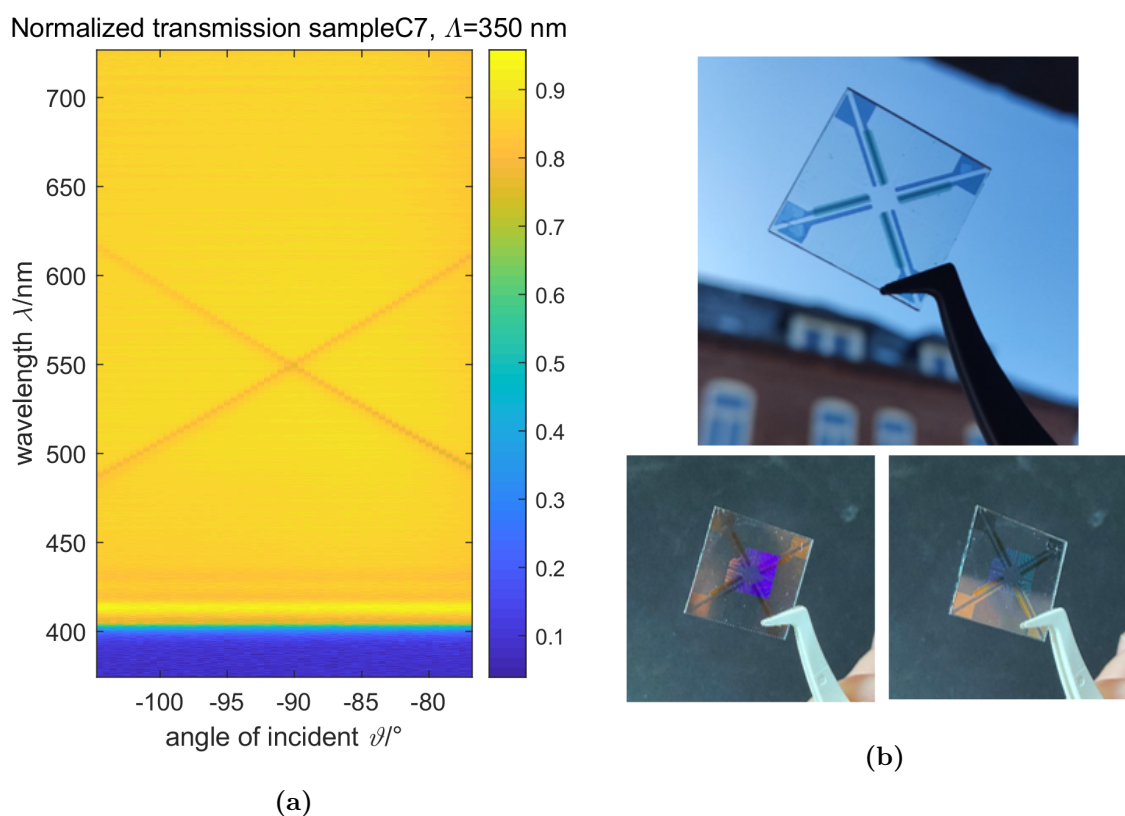


Abbildung 2.5 – Normalisiertes Transmissionsspektrum (a) und Fotografien (b) einer nanostrukturierten AlPcCl-OPV

Kapitel 3

Fazit und Ausblick

In der vergangen Promotionszeit konnten einige, der 2018 gesteckten, Zwischenziele erreicht werden. So können reproduzierbar teiltransparente, flexible Polymersolarzellen hergestellt und bezüglich ihrer elektrischen und optischen Eigenschaften charakterisiert werden. Die unterschiedlichen Einflussfaktoren wie beispielsweise die Aktivschichtdicke oder die Topelektrode wurden ausreichend untersucht und ein Optimum gefunden.

Das Einbringen von Nanostrukturen in diese Solarzellen stellte sich in der Forschungszeit als nicht rentabel heraus, woraufhin sich der Forschungsschwerpunkt auf die schmalbandigen Absorber verschob. Es wurden verschiedene Materialien getestet und Solarzellen mit Nanostruktur zumindest optisch charakterisiert. Zukünftig wird ein laserbasiertes Messsystem zur Charakterisierung der nanostrukturierten Solarzellen eingesetzt, sodass die Effekte auch elektrisch messbar werden.

Die Hochskalierung und Integration der OPV in Zweifachverglasung war sehr ambitioniert und konnte in der vergangen Zeit nicht abgeschlossen werden.

Für mein Zukünftiges Promotionsvorhaben habe ich eine Anschlussfinanzierung am Lehrstuhl für Integrierte System und Photonik bei Prof. Gerken erhalten und kann somit die Forschung fortführen. Ich plane, die Promotion 2022 abzuschließen.

Abschließend bedanke ich mich erneut vielmals bei allen Beteiligten der EKSH für Ihre Förderung und Interesse an meinem Promotionsvorhaben.

Jan Sdaucht

Literaturverzeichnis

- [1] A Golubovic. Organic photoconductors may prove practical for solar cells. *Space/Aeronaut.:(United States)*, 48, 1967.
- [2] VY Merritt and HJ Hovel. Organic solar cells of hydroxy squarylium. *Applied Physics Letters*, 29(7):414–415, 1976.
- [3] DL Morel, AK Ghosh, T Feng, EL Stogryn, PE Purwin, RF Shaw, and C Fishman. High-efficiency organic solar cells. *Applied Physics Letters*, 32(8):495–497, 1978.
- [4] Sean E Shaheen, Christoph J Brabec, N Serdar Sariciftci, Franz Padinger, Thomas Fromherz, and Jan C Hummelen. 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Applied Physics Letters*, 78(6):841–843, 2001.
- [5] Jianqiu Wang, Zhong Zheng, Yunfei Zu, Yafei Wang, Xiaoyu Liu, Shaoqing Zhang, Maojie Zhang, and Jianhui Hou. A tandem organic photovoltaic cell with 19.6% efficiency enabled by light distribution control. *Advanced Materials*, page 2102787, 2021.
- [6] Jong Hyuk Yim, Sung-yoon Joe, Christina Pang, Kyung Moon Lee, Huiseong Jeong, Ji-Yong Park, Yeong Hwan Ahn, John C de Mello, and Soonil Lee. Fully solution-processed semitransparent organic solar cells with a silver nanowire cathode and a conducting polymer anode. *ACS nano*, 8(3):2857–2863, 2014.
- [7] James T McLeskey Jr and Qiquan Qiao. *Nanostructured organic solar cells*. CRC Press, Boca Raton, 2010.

-
- [8] Sidhgata V Sreenivasan, Shrawan Singhal, Christopher Mark Melliar-Smith, Frank Y Xu, and Byung-Jin Choi. Nanostructured organic solar cells, November 26 2008. US Patent App. 12/324,120.
- [9] Fan Yang and Stephen R Forrest. Photocurrent generation in nanostructured organic solar cells. *ACS nano*, 2(5):1022–1032, 2008.
- [10] Zongfu Yu, Aaswath Raman, and Shanhui Fan. Fundamental limit of nanophotonic light trapping in solar cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(41):17491–17496, 2010.

Abbildungsverzeichnis

- 1.1 Schematische Darstellung einer organischen Solarzelle im Querschnitt; Einfallendes Licht tranmittiert durch die Anode und erzeugt durch Absorption ein Exziton (roter Stern) in der aktiven Schicht; Die Ladungsträger werden über das Donator-Akzeptor-System getrennt und tragen zum Stromfluss bei; Donator-, Akzeptormoleküle sowie die Nanostruktur sind in den Vergrößerungen schematisch dargestellt. 2
- 2.1 UI-Kennlinien (a) und Transmissionspektren (b) organischer Solarzellen mit unterschiedlichen Top-Elektrodenmaterialien. 5
- 2.2 Simulation der Verteilung des elektrischen Feldes in einer organischen Solarzelle mit (links) und ohne (mittig) Nanostruktur. (links) Schematischer Schichtaufbau für die Simulation. Aktivschicht zwischen den Elektronen mit der Gitterstruktur (hier hellblau) unter der Kathode; das elektrische Feld zur Anregung wird von unten eingebracht (Pfeil). 7
- 2.3 Absorbierte Leistung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Gitterperioden mit P3HT:PCBM (a) und AlPcCl (b) als Aktivmaterial. . . 8
- 2.4 Strom-Spannungs-Kennlinie von AlPcCl-OPV; Dunkelstrom (blau), Photostrom der planaren Referenz (rot) und Photostrom der nanostrukturierten Solarzelle (grün) sind über der Spannung aufgetragen. 9
- 2.5 Normalisiertes Transmissionspektrum (a) und Fotografien (b) einer nanostrukturierten AlPcCl-OPV 10

Tabellenverzeichnis

2.1 Charakteristische Werte der hergestellten Solarzellen mit verschiedenen Top-Elektroden.	6
--	---