

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az

Referat

Fördersumme

Antragstitel

Entwicklung einer Technologie für textile Oberflächen zur Elektrizitätserzeugung durch organische Photovoltaik, AZ 33633

Stichworte

Farbstoffsolarzellen, textilbasierte Solarzellen, Photovoltaik

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
30 Monate	16.10.2017	15.4.2020	3
Zwischenberichte	Kurzbericht zum Projektfortschritt zum 15.05.2018 vom 08.05.2018	Kurzbericht zum Projektfortschritt zum 31.10.2018 vom 21.11.2018	Kurzbericht zum Projektfortschritt zum 30.04.2019 vom 24.05.2019

Bewilligungsempfänger

InovisCoat GmbH, Rheinparkallee 3, 40789 Monheim

Tel 0176 477 152 44

Fax 0217310144199

Projektleitung

Moritz Graf zu Eulenburg

Bearbeiter

Dr. Georg Grötsch, Dr. Carsten
Cornelißen, Almuth Streitenberger

Kooperationspartner

Fachhochschule Bielefeld, Interaktion1, 33619 Bielefeld

Hochschule Niederrhein, Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld

Inhaltsverzeichnis

- Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	S. 1
- Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	S. 1
- Zusammenfassung	S. 2
- Einleitung	S. 2
- Hauptteil	S. 3
• Prinzip und Anwendungsmöglichkeiten	
• Weg	
• Materialauswahl	
• Anode	
• Kathode	
• Halbleiter für textile Farbstoffsolarzellen	
• Herstellung und Evaluierung der textilen Solarzelle	
• Funktionsmuster als Demonstrator	
- Fazit	S.11
- Literaturverzeichnis	S.11
- Anhänge	S.12
- Öffentlichkeitsarbeit und Präsentationen	S.13

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

- Abb. 1. Elektrische Charakterisierung von Vollfolienzellen mit einem Nanovlies zwischen den Elektroden
- Abb. 2. Folienbasierte Farbstoffsolarzellen mit reinen Folien (links) sowie zusätzlich mit Graphitspray behandelten Folien
- Abb. 3. PAN/TiO₂-Folien, aufgebracht auf leitfähigen Gläsern und Graphitfolien, vor (links) und nach dem Färben
- Abb. 4. Messungen an DSSCs, in denen die TiO₂-Schicht und die Graphit-Schicht in einer Folie vereint sind; die Gegenelektrode bildet ein ManSolar-FTO-Glas
- Abb. 5. Strom-Spannungs-Kennlinien herkömmlicher glasbasierter DSSCs mit kommerziell erhältlicher TiO₂-beschichteter Frontelektrode („Mansolar“) sowie mit eigener TiO₂-Paste, hier hergestellt mit 25 % TiO₂ (P25), 25 % Triton X-100 und 50 % H₂O
- Abb. 6. Strom-Spannungs-Kennlinien glasbasierter Solarzellen mit Anthocyanin und blauer Tinte als Farbstoffgemisch
- Abb. 7. Messungen an DSSCs aus Graphit/PEDOT:PSS-Folie als Gegenelektrode und leitfähigem Glas mit TiO₂, gefärbt mit Tee, als Frontelektrode, sowie Iod/Kaliumiodid als Elektrolyt
- Abb. 8. I-U-Kennlinie einer Alginat-Glycerin-Farbstoffsolarzelle
- Bild des Demonstrators

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

PEDOT:PSS.	Poly-3,4-ethylendioxythiophen:Polystyrolsulfonat
TiO ₂ .	Titandioxid
ZnO	Zinkoxid
Dip-Coaten.	Beschichten durch Eintauchen in eine Wirkstoff-Lösung
Grätzel-Zelle.	Bionische, elektrochemische Farbstoff-Solarzelle
Si.	Silicium
NIR.	Nahes Infrarot (780 nm – 3 µm)
PET-SiOx.	Polyethylenterephthalat-Siliziumoxid (1,05-1,5)
FHB	Fachhochschule Bielefeld
HSN	Hochschule Niederrhein

Zusammenfassung

Farbstoffsolarzellen stellen inzwischen eine interessante Alternative zu siliziumbasierten Solarzellen dar. Auch wenn ihre Wirkungsgrade noch deutlich niedriger als die herkömmlicher Solarzellen liegen, lassen sie sich jedoch ohne Reinraumbedingungen und aus relativ preiswerten, ungiftigen Materialien herstellen.

In dem Projekt wurden erste Schritte zu textilbasierten Farbstoffsolarzellen für eine autarke Stromversorgung erfolgreich getan. Im Labor- und kleinen Pilotanlagenmaßstab wurden funktionierende Solarzellen im Wesentlichen aus Naturstoffen hergestellt und in ihrer Effektivität vermessen. Hierbei wurden keine umweltschädlichen Substanzen eingesetzt, insbesondere keine organischen Lösemittel und keine Schwermetalle. Die Prozesse sind skalierbar und sollten auf typischen Textilbeschichtungsmaschinen durchführbar sein wie erste Pilotversuche auf Begussmaschinen zeigen.

Das Ziel des Projektes, textilbasierte, im Industriemaßstab aufgetragene Farbstoffsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von etwa 1 % und einer Lebensdauer von mindestens 1 Jahr darzustellen, wurde annähernd erreicht.

In weiteren Arbeiten sollte man bessere Alternativen für den Elektrolyten suchen, der langzeitbeständiger ist und stabiler in den Verbund eingebaut werden kann.

An den Arbeiten waren maßgeblich die Fachhochschule Bielefeld, Interaktion1, 33619 Bielefeld und die Hochschule Niederrhein, Reinartzstr. 49, 47805 Krefeld beteiligt.

Wir bedanken uns für die Förderung durch die Deutsche Stiftung Umwelt unter dem AZ 333633.

Einleitung

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In dem vorgeschlagenen Projekt sollten textilbasierte Farbstoffsolarzellen zur autarken Stromversorgung entwickelt werden. Insbesondere sollen diese Solarzellen in Situationen Anwendung finden, in denen eine dauerhafte Stromversorgung auf anderem Weg nicht oder nur sehr umständlich realisiert werden kann. Neben Anwendungen im Outdoor-Bereich – um beispielsweise ein Mobiltelefon aufladen und einen Notruf absetzen zu können – ist hier auch an die autarke Stromversorgung beispielsweise für Sensoren in schwer zugänglichen technischen Textilien (z. B. textilen Bauten), für Peilsender in Rettungsinselfn o. ä. zu denken.

Zur Realisierung eines besonders umweltschonenden Aufbaus sollen in dem geplanten Vorhaben keine umweltschädlichen Substanzen eingesetzt werden. Insbesondere wird auf den Einsatz organischer Lösemittel verzichtet. Auch sollen keine Schwermetalle als Elektrodenmaterial zum Einsatz kommen. Die in diesem Projekt eingesetzten Chemikalien sind in der Regel preiswert zu beschaffen und ökologisch sowie toxikologisch akzeptabel. Eine Ausnahme sind die leitfähigen Kunststoffe und Ruthenium-Farbstoffe für das Benchmarking.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Nach der Materialauswahl wurden alle Schichten der Farbstoffsolarzelle untersucht und optimiert.

Als Elektrodenmaterialien wurden unterschiedliche Textilien eingesetzt, die metallisiert oder durch verschiedene Beschichtungen leitfähig gemacht wurden. Auch leitfähige Folien der InovisCoat kamen hier zum Einsatz, da sie neben einer sehr großen Homogenität auch die Möglichkeit boten, verschiedene Materialien zu mischen oder in der benötigten Reihenfolge aufeinanderzuschichten.

Als mögliche Halbleitermaterialien wurden TiO₂ und ZnO in verschiedenen Varianten aufgetragen, u. a. mittels stromloser Beschichtung von ZnO auf unterschiedlichen Textilien, aber auch in Form elektrogenespinnener Nanofasern.

Gefärbt wurden diese Halbleiter mit Anthocyanen und anderen Farbstoffen sowie Farbstoffkombinationen.

Zur Verfestigung des Elektrolyten in Gel- oder Polymerform sowie zur Verbesserung seiner Langzeitstabilität wurden intensive Versuche mit verschiedensten Materialkombinationen unternommen.

Ein vollständig textiles Funktionsmuster wurde mittels Elektrosplennens erzeugt, wobei die Leitfähigkeit der Elektroden in einem zweiten Schritt durch Dip-Coaten mit dem leitfähigen Polymer PEDOT:PSS erzeugt wurde.

Hauptteil

Prinzip und Anwendungsmöglichkeiten

Immer mehr Gebäude und sogar ganze Kommunen versorgen sich eigenständig mit Strom auf Basis erneuerbarer Energien. Laut eines Berichts des Bundesministeriums für Wirtschaft und Umwelt [Bun16] ist der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttostromverbrauch von 27,3 Prozent im Jahr 2014 auf 31,6 Prozent im Jahr 2015 angestiegen und erreichte in 2019 nahezu 43 Prozent [pv-magazine.de, 18.12.2019]. Neben Biogasanlagen spielen künftig auch Windkraft- und Photovoltaikanlagen eine große Rolle. Eine besondere Form von photovoltaischen Zellen sind die Grätzel-Zellen, auch Farbstoffsolarzellen genannt. Diese basieren auf der Absorption von sichtbarem und nahem UV-Licht durch Farbstoffmoleküle. Sie sind im Vergleich zu Siliziumzellen kostengünstiger herzustellen und werden daher im Markt zunehmend nachgefragt. Insbesondere die Integration in Gebäude ist von Interesse. So sah das Marktforschungsunternehmen Pike Research für das Jahr 2016 ein weltweites Investitionsvolumen von 4 Mrd. USD in diesem Bereich voraus [Men10].

Obwohl die absoluten Wirkungsgrade von Farbstoffsolarzellen im Vergleich zu Siliziumzellen (Si-Zellen) geringer sind, verzeichnet der Wirkungsgrad der Farbstoffsolarzelle eine geringere Abhängigkeit von der Strahlungsrichtung und auch weniger Verluste bei bewölktem Himmel. Barber *et al.* konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass der Wirkungsgrad einer DSSC bei bewölktem Himmel (diffuse Strahlung) um 9 % abnahm, wohingegen die Siliziumzelle eine Verringerung um 15 % verzeichnete. Die Beleuchtungsstärke lag dabei bei 88,3 mW/cm² und 89,1 mW/cm² [Bar11]. Daher besitzen Farbstoffsolarzellen für mobile Anwendungen und bewölkten Himmel ein interessantes Potential.

Der Wirkungsgrad hängt weiterhin von der spektralen externen Quanteneffizienz (QE) ab. Diese setzt sich aus der internen QE und dem reflektierten Strahlungsanteil zusammen und umfasst bei Si-Zellen einen größeren Bereich, der bis in den NIR-Teil des Spektrums reicht. Allerdings liegt die Bandlücke der Si-Zellen i. d. R. niedriger als bei Farbstoffsolarzellen. Da die Energie der erzeugten Elektronen jedoch niemals höher als die der Bandlücke sein kann, ist die theoretische erreichbare Energieeffizienz bei Farbstoffsolarzellen höher als bei Si-Zellen. Unter Berücksichtigung weiterer Faktoren haben Shockley und Queisser die Abhängigkeit des theoretischen maximalen Wirkungsgrades von der Bandlücke untersucht [Sho61].

Die Wichtigkeit, die der Weiterentwicklung von Farbstoffsolarzellen aus diesen Gründen beigemessen wird, zeigt sich auch in der Vielzahl aktueller Publikationen, die sich beispielsweise mit dem theoretischen Verständnis der Prozesse in einer Grätzelzelle [Mun15], alternativen Farbstoffen [Ron15, Hig15] oder neuartigen Strukturen von TiO₂ auf meso- und makroskopischen Skalen beschäftigen [Hon15, So15].

Um das Anwendungspotenzial der Solarzellen vollständig auszuschöpfen, wird in dem hier vorgestellten Ansatz auf Glas verzichtet und stattdessen ein Textil eingesetzt. Durch den

Einsatz eines flexiblen Substrats kann die Solarzelle dem Einsatzgebiet entsprechend angepasst werden. Insbesondere kommen Anwendungsgebiete im Bereich des Textilen Bauens in Frage. Textile Dachkonstruktionen werden immer häufiger in öffentlichen Gebäuden, Flughäfen und auch Stadien aufgrund ihrer Leichtgewichtigkeit und der Belüftungsmöglichkeiten im Gegensatz zu herkömmlichen Dachkonstruktionen eingesetzt. Darüber hinaus sind auch mobile Konstruktionen denkbar, bei denen ein Anschluss an ein Stromnetz nicht gewährleistet ist und somit mit diesen Zellen Strom generiert werden kann. Beispiele hierfür sind Rettungsinseln, Zelte und mobile Dachkonstruktionen zum Schutz vor Wettereinflüssen, die nicht nur im Sportbereich, sondern insbesondere auch nach Naturkatastrophen in meist abgelegenen Regionen zum Einsatz kommen.

Der Wirkungsgrad aktueller Grätzel-Zellen auf Glas bzw. Folie liegt zwischen 10 und 14 %. Diese Effizienz ist auf Textilflächen noch nicht zu erwarten. Während der Literaturstudie ist aufgefallen, dass die Effizienz mit zunehmender Größe abnimmt. Da in diesem Projekt großflächige Einzelzellen von mehreren Quadratzentimetern realisiert werden sollen, kann bei einem Wirkungsgrad von 1 % von einem großen Erfolg gesprochen werden. Die in diesem Projekt eingesetzten Chemikalien sind in der Regel preiswert zu beschaffen. Eine Ausnahme sind die leitfähigen Kunststoffe und Ruthenium-Farbstoffe für das Benchmarking. Da aufgrund der Substratwahl keine energieintensiven Verarbeitungsschritte notwendig bzw. möglich sind, waren Alternativen zur Hochtemperatur-Sinterung von Titandioxid im Fokus, z. B. die stromlose Beschichtung mit ZnO.

Die textilbasierten Farbstoffsolarzellen dienen zur autarken Stromversorgung. Insbesondere sollen diese Solarzellen in Situationen Anwendung finden, in denen eine dauerhafte Stromversorgung auf anderem Weg nicht oder nur sehr umständlich realisiert werden kann. Neben Anwendungen im Outdoor-Bereich – um beispielsweise ein Mobiltelefon aufzuladen und einen Notruf absetzen zu können – ist hier auch an die autarke Stromversorgung beispielsweise für Sensoren in schwer zugänglichen technischen Textilien (z. B. textilen Bauten), für Peilsender in Rettungsinseln o. ä. zu denken. Zur Realisierung eines besonders umweltschonenden Aufbaus wurden keine umweltschädlichen Substanzen eingesetzt. Insbesondere wurde auf den Einsatz organischer Lösemittel verzichtet. Auch sollten keine Schwermetalle als Elektrodenmaterial zum Einsatz kommen. Hierdurch auftretende Probleme in der Generierung der textilbasierten Farbstoffsolarzellen konnten in wesentlichen Punkten durch entsprechende Verfahrensoptimierungen gelöst werden.

Weg

Um die genannten Ziele zu realisieren, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt: Zunächst legten die Partner die Materialien endgültig fest. Folgender Aufbau war dabei zu bedenken: textiler Träger, Kathode, Halbleiter mit Farbstoffschicht, Elektrolyt, Anode und Verkapselung auf der transparenten Seite. Unter den Aspekten der Umweltfreundlichkeit und der Kosten- und Energieeffizienz wurden die zur Verfügung stehenden Materialien für die einzelnen Funktionsschichten evaluiert und eine Prioritätenliste aufgestellt. Es wurde ein Pflichtenheft mit den zu erzielenden Kennwerten Spannung, Leistung und Haltbarkeit aufgestellt.

Materialauswahl

Wie im ersten Zwischenbericht dargestellt, wurden zunächst die Materialien ausgewählt, die in diesem Projekt bevorzugt untersucht werden sollten. Für die Halbleiterschicht sollten TiO_2 sowie ZnO in die nähere Betrachtung kommen, da von TiO_2 zwar höhere Wirkungsgrade der Farbstoffsolarzellen erwartet werden können, dieses Material im Normalfall aber einen Sinterschritt bei hohen Temperaturen erfordert, der auf den meisten textilen Materialien nicht durchgeführt werden kann, während ZnO auch stromlos auf verschiedenen Textilien abgeschieden werden kann.

Als Farbstoffe sollten insbesondere Anthocyane sowie alternativ auch Betalaine untersucht werden. Für den Elektrolyten wurde Iod/Kaliumiodid gewählt. Verschiedene leitfähige Textilbeschichtungen wie Kohlenstoff in unterschiedlichen Modifikationen, PEDOT:PSS, Kupfer- und Silberbeschichtungen wurden für die Gegenelektrode ausgewählt.

Anode

Für die Anode wurden verschiedene Materialien untersucht. An diesem Arbeitspunkt waren beide Hochschulen beteiligt. Auf die von der Hochschule Niederrhein entwickelten Elektroden wurde anschließend von der FH Bielefeld Halbleiter aufgetragen. Somit konnte aufgrund der Haftung des Halbleiters auf der Elektrode eine Selektion vorgenommen werden. Dabei flossen intensiv die bei InovisCoat vorhandenen Kenntnisse zum Aufbau und zur Stabilität von Schichtpaketen ein, unterstützt von Labor- und Pilotanlagenversuchen bei der InovisCoat.

Die von der InovisCoat entwickelten leitfähigen Folien mit TiO_2 wurden, wie im zweiten Zwischenbericht bereits beschrieben, zu vollständigen Folien-Farbstoffsolarzellen zusammengebaut und elektrisch charakterisiert. Die ersten Ergebnisse zeigten Kurzschlüsse, die sich auch mit verbesserten Folien – die halbkugelförmige „Abstandhalter“ zwischen den leitfähigen Schichten enthielten – nicht reduzieren ließen. Die Einbettung eines elektrogenesponnenen isolierenden Nanovlieses zwischen den leitfähigen Folien führte in der Tat zu solarzellentypischen Kennlinien (Abb. 1), jedoch mit sehr kleinen Strömen und Spannungen.

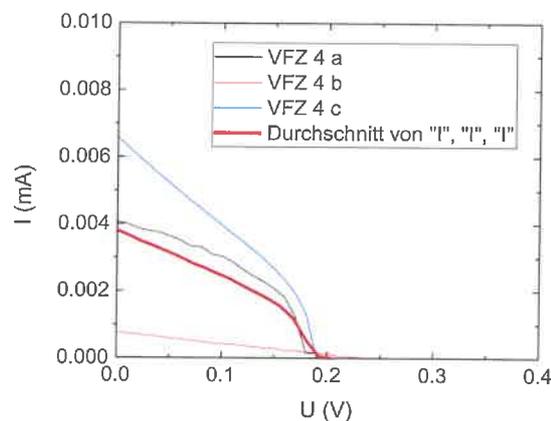


Abb. 1. Elektrische Charakterisierung von Vollfolienzellen mit einem Nanovlies zwischen den Elektroden.

Kathode

Auch für die Kathode wurden verschiedene Materialien untersucht. Hierfür kommen nur transparente leitfähige Materialien in Frage. Zunächst wurden verschiedene PEDOT:PSS-Folien auf der Pilotanlage der InovisCoat für Versuchszwecke hergestellt und den Hochschulen für Versuche zur Verfügung gestellt, und u. a. mit Lugol'scher Lösung versehen. Dann wurde vorrangig Graphit und PEDOT:PSS als Elektrodenmaterial erforscht. Da es auch ein guter organischer Leiter ist, wurden damit PET/SiO_x-Folien beschichtet, die als Elektrode fungierten.

Nachdem sich die Graphitschicht sehr bald als ein entscheidender Faktor für die Reproduzierbarkeit von Farbstoffsolarzellen herausstellte [Höl18], wurde dieses Thema intensiv bearbeitet. Mit verschiedensten Methoden des Graphit-Auftrags ließen sich, wie im ersten Zwischenbericht genauer erläutert, keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen, weshalb leitfähige Folien auf Basis von Graphit und Ruß durch die InovisCoat hergestellt wurden, die zunächst als Gegenelektroden in Kombination mit kommerziellen Glas/TiO₂-Frontelektroden untersucht wurden und sich dabei als gut geeignet herausstellten (Abb. 2).

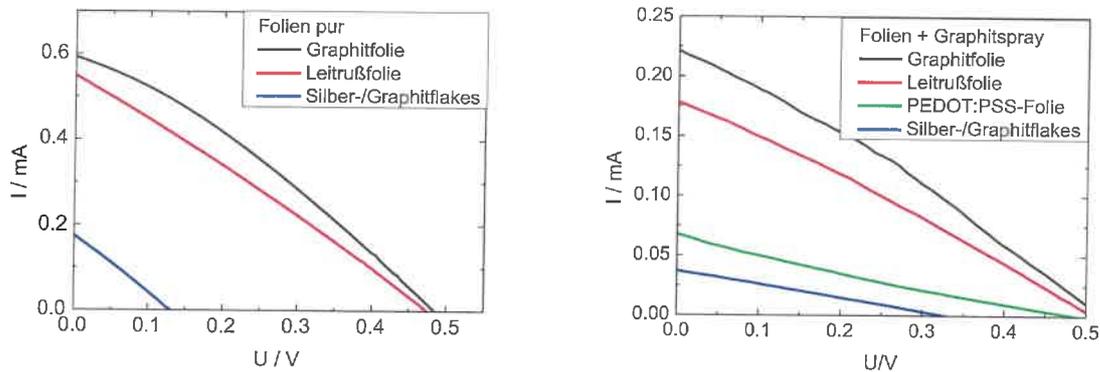


Abb. 2. Folienbasierte Farbstoffsolarzellen mit reinen Folien (links) sowieso zusätzlich mit Graphitspray behandelten Folien (rechts).

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden verschiedenste Folien als Kathoden untersucht, was in einer deutlichen Erhöhung der Leerlaufströme insbesondere für Graphit/PEDOT:PSS-Folien führte, wie im zweiten Zwischenbericht dargestellt.

Für die Nutzung verschiedener textiler Gegenelektroden, u. a. aus einem Kupfergewebe sowie beschichtet mit PEDOT:PSS oder Tubicoat, wurden unterschiedliche Verfahren untersucht, eine gleichmäßig, dünne Graphitschicht aufzutragen. Wie im zweiten Zwischenbericht dargelegt, stellte sich ein Spray-Auftrag mit anschließendem Tempern bei einer reduzierten Temperatur von 90 °C statt der meist empfohlenen 200 °C (was die Textilien geschädigt hätte) auf PEDOT:PSS-beschichteten Textilien als optimal heraus. Die erreichten Werte von mehr als 1 mA Kurzschlussstrom und bis zu 0.5 V Leerlaufspannung sind ähnlich den typischerweise mit reinen Glas-Farbstoffsolarzellen gemessenen Werten.

Halbleiter für textile Farbstoffsolarzellen

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Halbleitermaterialien auf ihre Eignung in textilen Farbstoffsolarzellen untersucht. Insbesondere die Adsorptionsfähigkeit des Farbstoffes auf dem Halbleiter wurde hier erforscht und mit den grundsätzlichen Erfahrungen bei InvisCoat abgeglichen. Darüber hinaus wurden auch Effekte durch künstliche Alterung (Xenon-Test) untersucht.

Um den Sinterprozess für TiO_2 -basierte Halbleiterschichten zu umgehen, wurden polymerbasierte Schichten, insbesondere auf Basis von Polyacrylnitril (PAN), mit TiO_2 dotiert (Abb. 3).



Abb. 3. PAN/ TiO_2 -Folien, aufgebracht auf leitfähigen Gläsern und Graphitfolien, vor (links) und nach dem Färben (rechts).

Während das TiO_2 in Folien sowie in elektrogenesponnenen Nanofasern photokatalytisch aktiv ist [Gro18], lassen sich jedoch nur geringe Ströme damit erzeugen. Im zweiten Berichtszeitraum konnten diese Werte durch die Nutzung von TiO_2 -basierten Folien, hergestellt von der InvisCoat, um rund eine Größenordnung verbessert werden. Sie lagen damit aber immer noch etwa eine Größenordnung unter den typischerweise mit separaten TiO_2 -Schichten erreichbaren Kurzschlussströmen (Abb. 4).

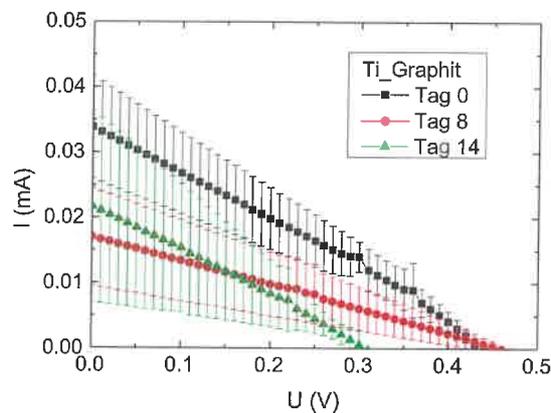


Abb. 4. Messungen an DSSCs, in denen die TiO_2 -Schicht und die Graphit-Schicht in einer Folie vereint sind; die Gegenelektrode bildet ein ManSolar-FTO-Glas.

Aus diesem Grund wurde ebenfalls versucht, die TiO_2 -Schicht zu optimieren. Hierzu wurde u. a. mit dem Tensid Triton X-100 gearbeitet. Durch die Optimierung des Verhältnisses von TiO_2 zu Triton X-100 konnte die Kurzschlussstromstärke ungefähr verdoppelt werden (Abb. 5) [Udo20].

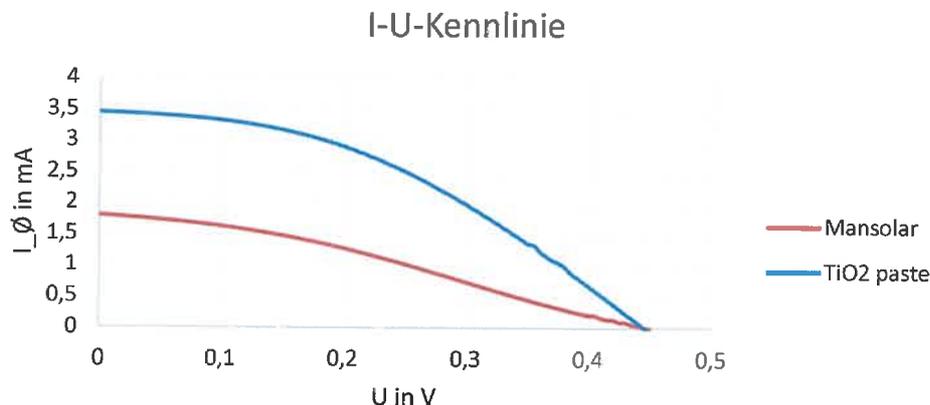


Abb. 5. Strom-Spannungs-Kennlinien herkömmlicher glasbasierter DSSCs mit kommerziell erhältlicher TiO_2 -beschichteter Frontelektrode („Mansolar“) sowie mit eigener TiO_2 -Paste, hier hergestellt mit 25 % TiO_2 (P25), 25 % Triton X-100 und 50 % H_2O .

Des Weiteren wurden Glasfaser-Gewebe als mögliche textile Substrate untersucht, auf denen das Sintern einer TiO_2 -Schicht bei hohen Temperaturen möglich ist. Hier wurde eine Sintertemperatur von $500\text{ }^\circ\text{C}$ genutzt. In Kombination mit einer graphitbeschichteten Glas-Gegenelektrode konnten jedoch nur geringe Ströme (etwa um einen Faktor 20 niedriger als typische Werte für reine Glas-Solarzellen) gemessen werden, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

Neben der Halbleiterschicht wurden auch Farbstoffe untersucht, die aus Blüten sowie verschiedenen Tees gewonnen wurden [Koh19]. Hierbei erwiesen sich insbesondere der Tee „Lichtermagie“ sowie getrocknete Hibiskusblüten als deutlich langzeitstabiler als der Durchschnitt.

Um die Farbstoffschicht weiter zu optimieren, wurden im aktuellen Berichtszeitraum Versuche zu Farbstoffmischungen durchgeführt. Die auf diese Weise erzielten Kurzschlussströme waren jedoch nicht besser als die mit reinen Anthocyan-Farbstoffen erreichten Werte (Abb. 6). Auch die Langzeitstabilität der Solarzellen ließ sich auf diese Weise nicht verbessern.

I-U-Diagramm – Tag 0

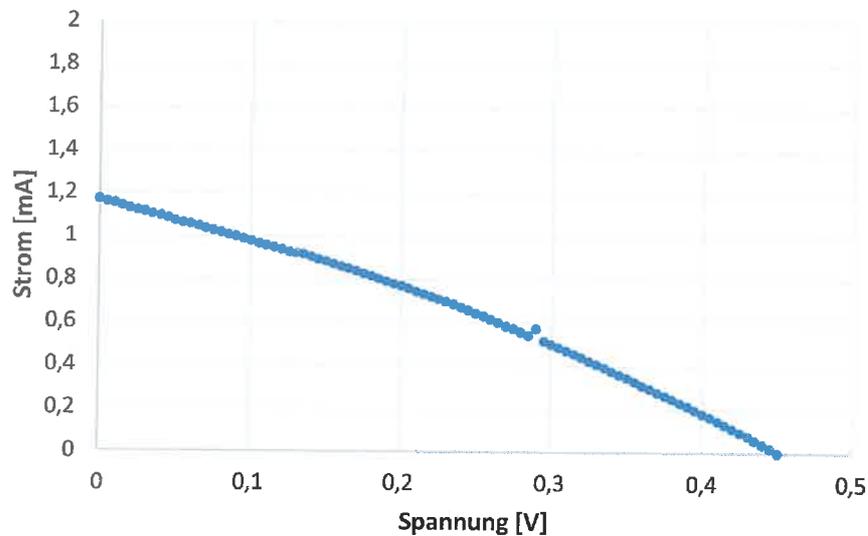


Abb. 6. Strom-Spannungs-Kennlinien glasbasierter Solarzellen mit Anthocyanin und blauer Tinte als Farbstoffgemisch.

Eine große Herausforderung stellt der Elektrolyt dar, da reines Iod/Kaliumiodid flüssig und damit nicht für textile Substrate geeignet ist. Im Rahmen des Projektes wurden daher verschiedene Ansätze verfolgt, einen Gel- bzw. Festelektrolyten unter Nutzung ungiftiger, nicht umweltschädlicher Chemikalien herzustellen. Die ersten Ansätze zeigten eine Verlangsamung des Austrocknens des Elektrolyten durch die Hinzugabe von Gelatine in verschiedenen Varianten. Hierzu wurden verschiedene Gelatinesorten von InovisCoat bei der Fa. Gelita angefragt. Eine weitere Testreihe von mehr als fünf Monaten Dauer belegte die Möglichkeit, mit einem glycerinbasierten (wasserfreien) Iod/Kaliumiodid-Elektrolyten auf dieser Zeitskala konstante bzw. sogar ansteigende Wirkungsgrade zu erzielen [Gos20]. Ein weiterer Ansatz, der im aktuellen Berichtszeitraum erprobt wurde, war die Nutzung eines PAN/Konjac-Gum-Nanovlieses als Matrix für den Elektrolyten. Konjac Gum ist ein gesundheitlich unbedenkliches Polysaccharid, das normalerweise als Verdickungs- und Gelmittel genutzt wird, da es große Wassermengen binden kann. Im Gegensatz zu Superabsorbent, die salzhaltige Flüssigkeiten – wie den hier genutzten Elektrolyten – nicht gut binden können, ist dieser hier negative Effekt für Konjac Gum nicht bekannt.

Wie in Abb. 7 zu sehen, ermöglicht das elektrolytgetränkte PAN/Konjac-Gum-Nanovlies in der Tat den Bau von Solarzellen, die trotz des leicht erhöhten Abstands zwischen beiden Elektroden gute Kurzschlussströme aufweisen, in derselben Größenordnung wie reine Glas- oder Glas-/Foliensolarzellen mit denselben Materialien. Entgegen den Erwartungen nehmen die Kurzschlussströme jedoch sehr schnell ab; das Nanovlies ist also nicht in der Lage, den Elektrolyten wie in einer Matrix zu speichern.

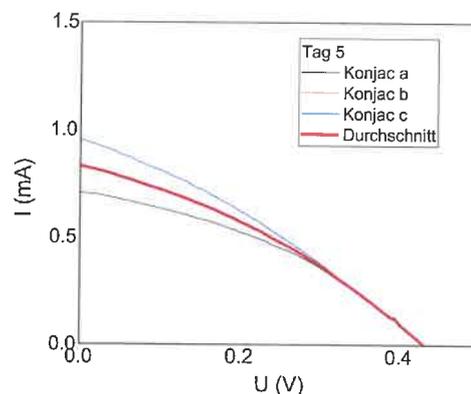
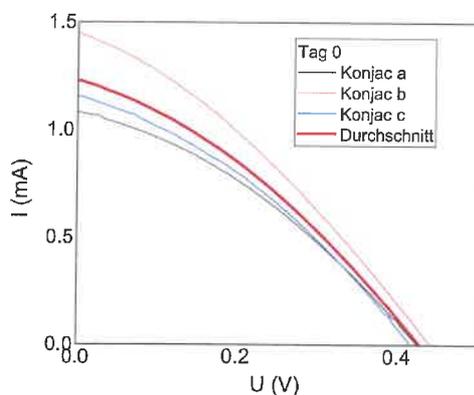


Abb. 7. Messungen an DSSCs aus Graphit/PEDOT:PSS-Folie als Gegenelektrode und leitfähigem Glas mit TiO_2 , gefärbt mit Tee, als Frontelektrode, sowie Iod/Kaliumiodid als Elektrolyt.

Für weitere Versuche, den Elektrolyten zu polymerisieren, wurde Natrium-Alginat genutzt, das mittels CaCl_2 polymerisiert wurde. Hierdurch wurden interessanterweise die Kurzschlussströme erhöht, unerwartet jedoch Leerlaufspannungen und Füllfaktoren reduziert, wie in Abb. 8 zu erkennen. Die höchsten Kurzschlussströme wurden mit einer Kombination des Glycerin-Elektrolyten mit Alginat erzielt, wobei die Werte im Vergleich zu einem kommerziellen Iod-Kaliumiodid-Elektrolyten bei ansonsten gleichen Materialien etwa verdoppelt werden konnten. Eine Erhöhung der Langzeitstabilität durch die Gelierung konnte jedoch nicht erreicht werden; im Gegenteil zeigten die meisten Zellen – selbst die mit einem Glycerin-Elektrolyten – bereits nach etwa drei Wochen eine deutliche Reduktion des Kurzschlussstromes und damit des Wirkungsgrades.

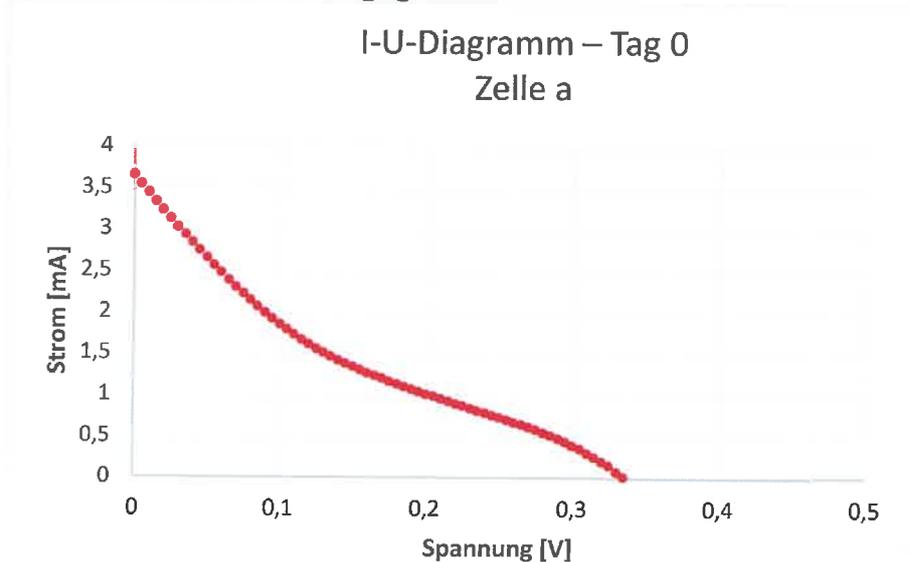


Abb. 8. I-U-Kennlinie einer Alginat-Glycerin-Farbstoffsolarzelle.

In einer weiteren Testreihe wurde Agar mit dem Elektrolyten in Wasser gelöst und als Gel-Elektrolyt genutzt, hierbei wurden zwar zum Teil relativ hohe Leerlaufspannungen von etwa 0,6 V erreicht, jedoch nur niedrige Kurzschlussströme in der Größenordnung 0,1-0,2 mA.

Auch Gel-Elektrolyten auf Basis von PEO (Polyethylenoxid) erreichten ähnlich niedrige Kurzschlussströme. Wurde PEO jedoch statt in Wasser in DMSO (Dimethylsulfoxid) gelöst, wurden Werte in der Größenordnung 0,4 mA erreicht. Interessanterweise nahm die Leistung bzw. der Wirkungsgrad bei Zellen mit PEO-basierten Elektrolyten während der ersten Wochen mit der Zeit zu, im Gegensatz zu Zellen mit herkömmlichen wasserbasierten Elektrolyten. Diese Langzeitversuche werden über das Ende der Projektdauer hinaus weiter ausgewertet und im Anschluss publiziert.

Herstellung und Evaluierung der textilen Solarzelle

Die in den vorherigen Schritten entwickelten Materialien sollten im nächsten Schritt mit einem Gießer simultan auf ein Textil gegossen werden. Physikalische und technologische Skaleneffekte mussten hier berücksichtigt werden. Insbesondere der gleichzeitige Auftrag der einzelnen Schichten sollte untersucht werden.

Nachdem die Materialien für die Elektroden und die Halbleiterschicht bekannt waren, wurden von den beteiligten Partnern Versuchsmuster im Labor erzeugt. Diese variieren in den

für die einzelnen Schichten verwendeten Materialien. Hier erfolgte eine endgültige Auswahl für den Demonstrationsversuch.

Alle Schichten wurden kontinuierlich charakterisiert. Hierzu standen den Partnern unterschiedliche Methoden zur Verfügung, wie Rasterelektronenmikroskopie, EDX, AFM, elektrische Widerstandsmessungen mittels Vier-Punkt-Messungen und mechanische Untersuchungen (Drapierverhalten, Flexibilität, Zugfestigkeit).

Die gesamte Zelle wurde unter Standardbeleuchtung elektrisch charakterisiert, wozu in der FHB ein Versuchsstand zur Verfügung steht. Hier besteht auch die Möglichkeit einer elektrischen Charakterisierung mit einer Source Measure Unit (SMU) sowie der Messung der Austrittsarbeit in Nanometermaßstab mittels eines AFM (Rasterkraftmikroskop).

Neben der elektrischen Charakterisierung der vollständigen Farbstoffsolarzellen mittels einer SMU (Source Measure Unit) wurden insbesondere Messungen der Absorption verschiedenster Farbstoffe auf unterschiedlichen Untergründen untersucht. Dabei zeigten sich, wie im ersten Zwischenbericht genauer beschrieben, nicht nur deutliche Unterschiede zwischen den Farbstoffen in Hinblick auf die maximale wellenlängenabhängige Absorption, sondern auch je nach Stärke der chemischen Bindung an den genutzten Halbleiter unterschiedlich starke Verschiebungen der Wellenlänge des Absorptionsmaximums [Koh2019].

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde zudem eine Programmierung für die SMU erarbeitet, die das automatisierte Trainieren der erzeugten Farbstoffsolarzellen ermöglichte. Hierdurch ließen sich die Kurzschlussströme um bis zu etwa 50 % erhöhen, wie im zweiten Zwischenbericht genauer dargestellt (Paper in Vorbereitung).

Eine weitere Messreihe beschäftigte sich mit einer Langzeitmessung mit dauerhafter Beleuchtung. Hierbei wurden für unterschiedliche Glycerin-Elektrolyten meist leichte Erhöhungen der gemessenen Effizienz während eines Tages gemessen, in manchen Fällen fielen die Solarzellen aber auch nach einigen Stunden dauerhafter Beleuchtung aus. Da dies nur selten geschah, kann man davon ausgehen, dass es sich hierbei um einzelne fehlerhafte Solarzellen handelte, bei denen unbemerkte Probleme während der Herstellung aufgetreten waren.

Funktionsmuster als Demonstrator

Im aktuellen Berichtszeitraum wurde ein voll-textiles Funktionsmuster mittels Elektrospinsens hergestellt. Hierzu wurde zunächst ein PAN/Graphit-Nanovlies gesponnen, auf dem eine reine PAN-Nanovlies-Schicht aufgesponnen wurde. Für ein zweites Nanovlies wurden PAN mit Waldbeertee und TiO_2 versponnen und anschließend mit „Organic black bean extract“ nochmals gefärbt. Die äußeren Seiten wurden mit PEDOT:PSS getränkt, um leitfähig zu werden. Beim Zusammenbau wurden die Kanten mit Tesafilm verklebt; als Elektrolyt wurde kommerziell erhältlicher Iod/Kaliumiodid-Elektrolyt genutzt. Zum Vergleich wurde statt des Graphit-Nanovlieses eine Standard-Glas-Gegenelektrode mit Graphitschicht untersucht.

Alle auf diese Weise hergestellten Zellen zeigten eine Solarzellen-Charakteristik, wiesen also keinen Kurzschluss auf; ihre Kurzschlussströme lagen zwar eine Größenordnung unter den sonst maximal erreichten Werten, damit jedoch deutlich höher als beispielsweise die Solarzellen auf Glasfaser-Geweben. Interessanterweise zeigten die Voll-Nanovlies-Solarzellen auch signifikant höhere Kurzschlussströme als die Nanovlies/Glas-Solarzellen [Koh19a].

Ein ähnlicher Versuch, ZnO statt TiO_2 mit zu verspinnen, blieb erfolglos; die Nanovliese konnten auf diese Weise nicht angefärbt werden. Stattdessen wurden PAN- sowie PAN/ZnO-Nanovliese durch Dipcoaten mit ZnO beschichtet. Auch auf diese Weise ließ sich jedoch keine Solarzelle erzeugen [Tra19], während eine Beschichtung mit TiO_2 zumindest in sehr schwachen Solarzellen resultierte [Mam19].

Um die Effizienz zu erhöhen, wurde versucht, die sehr gut als Gegenelektroden geeigneten Graphit/PEDOT:PSS-Folien sowie weitere leitfähige Folien der InovisCoat mit PAN sowie verschiedenen PAN-Mischungen zu bespinnen. Hierbei stellte sich heraus, dass die meisten Folien sich nicht bespinnen ließen. Um die Adhäsion zu verbessern, wurden die Folien direkt vor dem Bespinnen plasmabehandelt, wodurch sich eine merkliche Verbesserung der Adhäsion erreichen ließ. Eine quantitative Auswertung der Adhäsion war aufgrund der Schließung der Hochschule wegen der Corona-Krise im Berichtszeitraum nicht mehr möglich und wird zurzeit sukzessive nachgeholt (Publikation geplant).

Fazit

Im Rahmen dieses Projektes wurden nach breiter Untersuchung vieler Varianten für Anode, Kathode und Halbleitermaterialien ein funktions- und leistungsfähiges Muster einer textilen Solarzelle hergestellt und charakterisiert werden.

Die halbtechnische Herstellung solcher textilen Solarzellen muss als gut möglich erachtet werden, wie die Herstellung von Bauteilen bei der InovisCoat zur weiteren Verarbeitung in den Hochschulen zeigt.

Dieser Erfolg wurde durch eine intensive, sehr offene und kooperative Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Industrieunternehmen ermöglicht.

Wegen der sehr herausfordernden Gestaltung des für die Funktionsfähigkeit des Elektronentransports zwischen Anode und Kathode entscheidenden Halbleiters sind für eine lange wirkende textile Solarzelle im großtechnischen Maßstab noch weitere Entwicklungsarbeiten notwendig. Insbesondere muss die Verflüchtigung dieses Halbleiters unterbunden werden. Nichtsdestotrotz ist mit dem vorliegenden Projekt erstmals gelungen, funktionierende textile Solarzellen herzustellen, die den Weg in Anwendungen im Outdoor-Bereich – beispielsweise ein Mobiltelefon aufladen, um einen Notruf absetzen zu können – oder auch an die autarke Stromversorgung beispielsweise für Sensoren in schwer zugänglichen technischen Textilien (z. B. textilen Bauten), für Peilsender in Rettungsinseln o. ä. zu weisen.

Literaturverzeichnis (nach DIN 1505)

- [Bun16] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin, September 2016.
- [pv-magazine.de, 18.12.2019] Ralph Diermann, *Erneuerbare Energien deckten 2019 fast 43 % des deutschen Stromverbrauchs*
- [Men10] Menn, A: *Bunte Zellen als Mini-Kraftwerke*, Handelsblatt Online, 21.11.2010
- [Bar11] Barber, G.D., Hoertz, P.G., Lee, S.A., Abrams, N.M., Mikulca, J., Mallouk, T.E., Liska, P., Zakeeruddin, S.M., Grätzel, M., Ho-Baillie, A., Green, M.A.: *Utilization of Direct, Diffuse Sunlight in a Dye-Sensitized Solar Cell — Silicon Photovoltaic Hybrid Concentrator System*. J. Phys. Chem. Lett. 2 (2011), 581–585.
- [Sho61] Shockley, W., Queisser, H.J.: *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*, Journal of Applied Physics 32 (1961), 510.
- [Mun15] Munoz-Garcia, A. B., Pavone, M.: *Structure and energy level alignment at the dye-electrode interface in p-type DSSCs: new hints on the role of anchoring modes from ab initio calculations*. Phys. Chem. Chem. Phys. 17 (2015), 12238-12246.
- [Ron15] Rong, Y. G., Mei, A. Y., Liu, L. F., Li, X., Han, H. W.: *All-solid-state Mesoscopic Solar Cells: From Dye-sensitized to Perovskite*. Act. Chim. Sin. 73 (2015), 237-251.
- [Hig15] Higashino, T., Imahori, H.: *Porphyrins as excellent dyes for dye-sensitized solar cells: recent developments and insights*. Dalton Transactions 44 (2015), 448-463.
- [Hon15] Hong, J.-Y., Bae, S.-E., Yong, S. et al.: *Simple preparation of lotus-root shaped meso-macroporous TiO₂ and their DSSC performances*. Journal of Colloid and Interface Science 448 (2015), 467-72.

- [So15] So, S., Kriesch, A., Peschel, U. et al.: *Conical-shaped titania nanotubes for optimized light management in DSSCs reach back-side illumination efficiencies > 8 %*. J. Mat. Chem. A 3 (2015), 12603-12608.
- [Höl18] Hölscher, F., Trümper, P.-R., Juhász Junger, I., Schwenzfeier-Hellkamp, E., Ehrmann, A.: *Raising Reproducibility in Dye-Sensitized Solar Cells under Laboratory Conditions*. Journal of Renewable and Sustainable Energy 10 (2018), 013506.
- [Gro18] Grothe, T., Böttjer, R., Wehlage, D., Großerhode, C., Storck, J. L., Juhász Junger, I., Mahltig, B., Grethe, T., Graßmann, C., Schwarz-Pfeiffer, A., Ehrmann, A.: *Photocatalytic properties of TiO₂ composite nanofibers electrospun with different polymers*. In: B. Mahltig, Y. Kyosev (Ed.), Inorganic and Composite Fibers, Woodhead Publishing (2018), 303-319.
- [Koh19] Kohn, S., Großerhode, C., Storck, J. L., Grötsch, G., Cornelißen, C., Streitenberger, A., Grassmann, C., Schwarz-Pfeiffer, A., Ehrmann, A.: *Commercially available teas as possible dyes for dye-sensitized solar cells*. Optik – International Journal for Light and Electron Optics 185 (2019), 178-182.
- [Gos20] Gossen, K., Ehrmann, A.: *Glycerin-based electrolyte for reduced drying of dye-sensitized solar cells*. Optik – International Journal for Light and Electron Optics 207 (2020), 163772.
- [Udo20] Udomrungkajornchai, S.; Juhász Junger, I.; Ehrmann, A. *Optimization of the TiO₂ layer in DSSCs by a nonionic surfactant*. Optik – International Journal for Light and Electron Optics 203 (2020), 163945.
- [Koh19a] Kohn, S., Wehlage, D., Juhász Junger, I., Ehrmann, A.: *Electrospinning a dye-sensitized solar cell*. Catalysts 9 (2019), 975.
- [Tra19] Trabelsi, M., Mamun, A., Klöcker, M., Sabantina, L., Großerhode, C., Blachowicz, T., Ehrmann, A.: *Increased mechanical properties of carbon nanofiber mats for possible medical applications*. Fibers 7 (2019), 98.
- [Mam19] Mamun, A., Trabelsi, M., Klöcker, M., Sabantina, L., Großerhode, C., Blachowicz, T., Grötsch, G., Cornelißen, C., Streitenberger, A., Ehrmann, A.: *Electrospun nanofiber mats with embedded non-sintered TiO₂ for dye-sensitized solar cells (DSSCs)*. Fibers 7 (2019), 60

Anhänge

Kurzbericht zum Projektfortschritt zum 15.05.2018 vom 08.05.2018

Kurzbericht zum Projekt- fortschritt zum 31.10.2018 vom 21.11.2018

Kurzbericht zum Projekt- fortschritt zum 30.04.2019 vom 24.05.2019

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentationen

Die Resultate des Projekts wurden in folgenden Veröffentlichungen und Artikeln publiziert:

- S. Udomrungkajornchai, I. Juhász Junger, A. Ehrmann: Optimization of the TiO₂ layer in DSSCs by a nonionic surfactant, *Optik – International Journal for Light and Electron Optics* 203, 163945 (2020)
- S. Kohn, D. Wehlage, I. Juhász Junger, A. Ehrmann: Electrospinning a dye-sensitized solar cell, *Catalysts* 9, 975 (2019)
- M. Trabelsi, A. Mamun, M. Klöcker, L. Sabantina, C. Großerhode, T. Blachowicz, A. Ehrmann: Increased mechanical properties of carbon nanofiber mats for possible medical applications, *Fibers* 7, 98 (2019)
- K. Gossen, A. Ehrmann: Glycerin-based electrolyte for reduced drying of dye-sensitized solar cells, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 207, 163772 (2019)
- A. Mamun, M. Trabelsi, M. Klöcker, L. Sabantina, C. Großerhode, T. Blachowicz, G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, A. Ehrmann: Electrospun nanofiber mats with embedded non-sintered TiO₂ for dye-sensitized solar cells (DSSCs), *Fibers* 7, 60 (2019)
- C. Graßmann, T. Grethe, A. Krause, C. Großerhode, J. L. Storck, A. Ehrmann, L. van Langenhove, Anne Schwarz-Pfeiffer: Textile Based Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes, *Proc. of 19th Autex World Textile Conference, Gent/Belgium, June 11-15, 2019*
- S. Kohn, C. Großerhode, J. L. Storck, G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, C. Grassmann, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Commercially available teas as possible dyes for dye-sensitized solar cells, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 185, 178-182 (2019)
- K. Gossen, J. L. Storck, A. Ehrmann: Influence of solvents on *Aloe vera* gel performance in dye-sensitized solar cells, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 180, 615-618 (2019)
- C. Großerhode, S. Kohn, J. L. Storck, G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, C. Grassmann, T. Grethe, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Investigation of dye-sensitized solar cells on different conductive elastic materials, *Proc. of Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Aachen/Germany, November 29-30, 2018*
- G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, C. Grassmann, T. Grethe, C. Großerhode, S. Kohn, J. L. Storck, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Development of textile-based organic photovoltaics, *Proc. of Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Aachen/Germany, November 29-30, 2018*
- T. Grothe, R. Böttjer, D. Wehlage, C. Großerhode, J. L. Storck, I. Juhász Junger, B. Mahltig, T. Grethe, C. Graßmann, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Photocatalytic properties of TiO₂ composite nanofibers electrospun with different polymers, in: B. Mahltig, Y. Kyosev (Ed.), *Inorganic and Composite Fibers*, Woodhead Publishing, pp. 303-319 (2018)
- R. Böttjer, D. Wehlage, T. Grothe, I. Juhász Junger, A. Ehrmann: Elektrospinnen von PAN/Carbon-Nanovliesen zur Integration in textilbasierte Farbstoffsolarellen, *Chemie Ingenieur Technik* 90, 1213 (2018)
- I. Juhász Junger, C. Großerhode, J. L. Storck, S. Kohn, T. Grethe, C. Grassmann, A. Schwarz-Pfeiffer, N. Grimmelsmann, H. Meissner, T. Blachowicz, and A. Ehrmann: Influence of graphite-coating methods on the DSSC performance, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 174, 40-45 (2018)

Vorträge:

- C. Graßmann, T. Grethe, A. Krause, C. Großerhode, J. L. Storck, A. Ehrmann, L. van Langenhove, Anne Schwarz-Pfeiffer: Textile Based Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dyes, *19th Autex World Textile Conference, Gent/Belgium, June 11-15, 2019*

- Irén Juhász Junger, Nils Grimmelsmann, Hubert Meissner, Andreas Herrmann, Tomasz Blachowicz, and Andrea Ehrmann: Influence of catalyzers on DSSC performance, Deutsche Physikerinnentagung, Ilmenau / Germany, October 01, 2017
- I. Juhász Junger, N. Grimmelsmann, S. V. Homburg, H. Meissner, T. Grethe, A. Schwarz-Pfeiffer, J. Fiedler, A. Herrmann, T. Blachowicz, A. Ehrmann: Investigation of natural dyes for textile based dye-sensitized solar cells, EMN Meeting on Smart and Multifunctional Materials, Rome / Italy, June 24-28, 2017
- I. Juhász Junger, S. V. Homburg, H. Meissner, T. Grethe, A. Schwarz-Pfeiffer, J. Fiedler, A. Herrmann, T. Blachowicz, A. Ehrmann: Influence of the pH value of the dye on the electrical properties of dye sensitized solar cells prepared with anthocyanins, DPG Spring Meeting, March 27-31, 2017, Münster / Germany
- I. Juhász Junger, S. V. Homburg, H. Meissner, T. Grethe, A. Schwarz-Pfeiffer, J. Fiedler, A. Herrmann, T. Blachowicz, A. Ehrmann: Einfluss des pH-Wertes von Anthocyan-Farbstoffen auf die elektrischen Eigenschaften von Farbstoffsolarzellen, Fachgruppentreffen des Graduierteninstituts NRW - Ressourcen, Bochum, March 16, 2017

Poster:

- C. Großerhode, S. Kohn, J. L. Storck, G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, C. Grassmann, T. Grethe, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Investigation of dye-sensitized solar cells on different conductive elastic materials, Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Aachen/Germany, November 29-30, 2018
- G. Grötsch, C. Cornelißen, A. Streitenberger, C. Grassmann, T. Grethe, C. Großerhode, S. Kohn, J. L. Storck, A. Schwarz-Pfeiffer, A. Ehrmann: Development of textile-based organic photovoltaics, Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference, Aachen/Germany, November 29-30, 2018
- K. Gossen, J. L. Storck, A. Ehrmann: Solvent dependence on the performance of *Aloe vera* dye for dye-sensitized solar cells, Women in Physics Conference 2018, Oldenburg/Germany, September 27-30, 2018
- R. Böttjer, D. Wehlage, T. Grothe, I. Juhász Junger and A. Ehrmann: Electrospinning PAN/carbon nanofiber mats for integration in textile-based solar cells, ProcessNet-Jahrestagung und 33. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2018, Aachen/Germany, September 10-13, 2018
- C. Graßmann, L. van Langenhove, A. Schwarz-Pfeiffer: Microwave assisted electroless deposition of zinc oxide on fabrics, Aachen-Dresden-Denkendorf International Textile Conference 2019, Dresden, November 26-27, 2019