

TourAtlas

PhotoTex



Zukunft unternehmen!



Automotive



BuildTech



InduTech



Luftfahrt



MedTech



MobilTech



SportTech



Windenergie

➤ Über das Forschungsprojekt futureTEX

Das Projekt futureTEX ist ein Gewinner im Programm „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Bis 2021 arbeiten wissenschaftliche Einrichtungen, Unternehmen und Verbände an der Entwicklung wesentlicher Bausteine eines Zukunftsmodells für Traditionsbranchen. Das Projektkonsortium futureTEX verfolgt das Ziel, die führende Position bei der Umsetzung der vierten industriellen Revolution im Textilmaschinenbau und in der Textilindustrie zu erringen und damit beispielhaft bis 2030 das modernste textilindustrielle Wertschöpfungsnetzwerk Europas aufzubauen. Mit der Entwicklung eines

Zukunftsmodells werden die Forschungsschwerpunkte Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, kundenintegrierte flexible Wertschöpfungsketten, textile Zukunftsprodukte, Wissens- und Innovationsmanagement sowie Arbeitsorganisation und Nachwuchssicherung gemeinschaftlich mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft bearbeitet. Das Konsortium umfasst aktuell über 300 involvierte Partner, darunter 70 Prozent aus der Industrie. Das Projekt futureTEX ist Preisträger im Wettbewerb „Ausgezeichneter Ort“ im Land der Ideen 2016.

➤ Abschlussdokumentation Umsetzungsvorhaben PhotoTex

Entwicklung photovoltaisch wirksamer Schichten auf Technischen Textilien

Laufzeit: 1. August 2016 – 31. Juli 2018

Das Umsetzungsvorhaben PhotoTex war eines von insgesamt 26 Umsetzungsvorhaben des Projekts futureTEX im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

Inhalt

Management Summary	6
Partner	7
Problemstellung und Motivation	10
Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele	10
Lösungsansatz	11
Ergebnisse	12
Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung	18
Ausblick	18

➤ Management Summary

Im Rahmen der Energiewende besteht zunehmend das Interesse sich mit multifunktionalen Sonderlösungen auseinanderzusetzen. Diese bestehen auch in funktionalisierten Technischen Textilien, die für die zusätzliche Energiegewinnung z. B. bei der gebäudeintegrierten Photovoltaik oder bei mobilen Außenanwendungen eingesetzt werden. Das Vorhabenkonsortium hat sich dieser Herausforderung gestellt und möchte einen Beitrag zur Funktionalisierung Technischer Textilien leisten. Ziel des Vorhabens war es, die jeweiligen Vorteile der Dünnschicht- und Nanotechnologien mit Textiltechnologien zu verknüpfen, um innovative und praxistaugliche Materialien mit photovoltaisch wirksamen Schichten auf Technischen Textilien zu entwickeln.

➤ Partner



Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Annaberger Straße 240 | 09125 Chemnitz
Ansprechpartnerin: Heidrun Mehlhorn
T: +49 371 5274-174 | heidrun.mehlhorn@stfi.de

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)

Neben den seit der Gründung 1993 bestehenden Kernkompetenzen bei klassischen Textiltechnologien, Vliesstoffen, Technischen Textilien sowie Textilprüfung/-zertifizierung erwarb das STFI u. a. in aktuellen Forschungsprojekten Know-how im Bereich des Prozess und Softwaremanagements, der textiltechnologischen Kopplung mit verschiedenen nicht-textilen Bauelementen wie z. B. mit Identifikationssystemen per RFID oder beim Einsatz von Informationstechnologien bei Entwicklung, Design und Herstellung von kundenindividuellen Textilprodukten. Da sich der Bereich der Technischen Textilien zu einem hochinnovativen Wachstumssegment entwickelt hat, setzt das STFI den Fokus zunehmend auf die Entwicklung branchenübergreifender, unternehmenszu-geschnittener Textiltechnologien mit unterstützender Prozessmodellierung.



Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS)
Technologie-Campus 3 | 09126 Chemnitz
Ansprechpartner: Dr. Jörg Martin
T: +49 371 45001-244 | joerg.martin@enas.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS)

Seit mehreren Jahren beschäftigt sich die Abteilung „Multi Device Integration“ des Fraunhofer ENAS unter anderem mit der Entwicklung, dem Aufbau und der Charakterisierung von Sensoren und Mikrosystemen auf der Basis neuer funktionaler Materialien, wie Funktionspolymeren und Nanokompositen. Das Spektrum reicht dabei von Feuchtesensoren bis hin zu Quantum-Dot-LEDs und Quantum-Dot-Sensoren. Mit den Arbeiten konnten wesentliche Kompetenzen zur Präparation von Schichtstapeln mit Nanopartikel- und entsprechenden Ladungstransportschichten erlangt werden. So wurden im EFRE-geförderten Verbundprojekt „Quasipink“ schmalbandige Lichtquellen im sichtbaren und NIR-Spektralbereich (QD LEDs) für den Einsatz in miniaturisierten Spektrometern entwickelt. Außerdem wurden im Rahmen von Projekten Quantum-Dots genutzt, um mechanische Belastungszustände zu detektieren, zu speichern und visuell sichtbar zu machen. Dazu wurden die Fluoreszenzeigenschaften der Nanokristalle durch Injektion von elektrischen Ladungen gezielt beeinflusst.



Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Winterbergstraße 28 | 01277 Dresden
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Lars Rebenklau
T: +49 351 2553-7986 | lars.rebenklau@ikts.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS)

Das Fraunhofer IKTS deckt das Feld der Technischen Keramik von der grundlagenorientierten materialwissenschaftlichen Vorlaufforschung bis zur Anwendung in komplexen Systemen in seiner ganzen Breite ab. Dafür werden unter anderem verschiedene Dickschicht- und Dünnschichttechnologien genutzt. Es bestehen langjährige Kompetenzen bei der Chemischen Gasphasenabscheidung (CVD), Physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) und Atomlagenabscheidung (ALD). Arbeitsschwerpunkte sind die Beschichtung von Fasermaterialien und die Herstellung verschiedener Funktionsschichten für die Mikroelektronik und Photovoltaik. Darüber hinaus bestehen Erfahrungen zum Backend von Photozellen.



erfal GmbH & Co. KG
Gewerbering 8 | 08223 Falkenstein
Ansprechpartner: Mario Schädlich
T: +49 3745 750-162 | m.schaedlich@erfal.de

Erfal GmbH & Co. KG

Seit 30 Jahren beliefert erfal als Komplettanbieter von Sonnenschutz, Fensterdekoration und Insektenschutz den Raumausstatter- und Sonnenschutzfachhandel. Erfal versteht sich hierbei als Komplettanbieter von Systemlösungen. Das Vorhaben PhotoTex unterstützt erfal durch die Erfassung und Bewertung verfügbarer Materialien, die für die Einsatzbedingungen geeignet sind, aber auch den technologischen Anforderungen für die Herstellung textilbasierter Solarzellen genügen müssen. Weiterhin werden die Verarbeitung sowie die Zuverlässigkeit der beschichteten Technischen Textilien unterstützt.



PONGS Technical Textiles GmbH
Bahnhofstraße 21 | 07919 Pausa-Mühltröf
Ansprechpartner: Pascal Steinmüller
T: +49 36645 350-300 | psteinmueller@pongs.de

PONGS Technical Textiles GmbH

Die Firma PONGS Technical Textiles GmbH ist ein namhafter Hersteller von Breitgeweben sowie Gewirken für technische Anwendungen in den Bereichen Messe- und Bühnenbau, Digitaldruck, Sonnenschutz, gewerbliche Dekoration sowie Innenausbau. PONGS wirkte bereits in verschiedenen Forschungsprojekten, wie z. B. „Bedruckbare Silikonbeschichtungen für den Außeneinsatz“ und „Lichtdeckensysteme“ mit.



Paul Rauschert GmbH & Co. KG
Technische Keramik und Kunststoff-Formteile
Anger 4 | 96110 Scheßlitz
Ansprechpartner: Michael Müller
T: +49 9265 78-311 | mic.mueller@prg.rauschert.de

Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH

Rauschert ist ein Technologieunternehmen mit Schwerpunkt in der Energietechnik. Im Geschäftsbereich Technische Keramik ist Rauschert Hersteller von anspruchsvollen Produkten für die Textilmaschinenindustrie, entwickelt gemeinsam mit den Kunden innovative Lösungen und hat über Jahrzehnte Erfahrungen und Kenntnisse im textilen Herstellungsprozess gesammelt.

Rauschert unterstützt das Vorhaben PhotoTex mit konzeptionellen Beiträgen zur Herstellung textiler Solarzellen, zur Herstellung von Solarmodulen und zur Installation von PV-Systemen. Hierzu werden elektrische Funktionstests nach mechanischer Belastung und nach Klimabelastung durchgeführt. Anhand von Demonstratoren wird die photovoltaische Funktion charakterisiert.



GILLES PLANEN GmbH
Quarzstraße 12 | 17036 Neubrandenburg
Ansprechpartner: Robert Gilles
T: +49 395 7072919 | info@gilles-planen.de

GILLES PLANEN GmbH

Die Firma GILLES PLANEN GmbH ist ein Hersteller von Sonderlösungen in den Bereichen Industrie, Landwirtschaft, öffentliche Bauten und Verkehr. Die Produkte stellen individuelle Anforderungen an flexible Lösungen für die Einsatzfälle Lärm-, Sonnen-, Staub- und Gewässerschutz.

Bisherige Entwicklungen greifen auf Lösungen aus unterschiedlichen Branchen zurück sowie auf Forschungsprojekte wie z. B. fluoreszierende Markisen. Ziele der Arbeiten von GILLES PLANEN sind die Prüfung der Eignung verschiedener Materialien und Strukturen für den Einsatz als textile Fassade, außenliegender Sonnenschutz (Sonnensegel und Markisentuch) und im Fahrzeugbereich (LKW Planen).

➤ Problemstellung und Motivation

Es gibt weltweit ein zunehmendes Interesse an der Funktionalisierung von Textilien zur Energiegewinnung. Der Schwerpunkt liegt gegenwärtig im Bereich der Bekleidungstextilien. Der Fokus liegt hier in der Integration von Energiespeichern oder Energieerzeugern in das Kleidungsstück, um portable Elektronikgeräte hinreichend mit Energie versorgen zu können. Erste Applikationsbeispiele wurden 2003 vorgestellt. Nur vereinzelt tauchen Berichte zur photovoltaischen Funktionalisierung Technischer Textilien auf. Generell werden unterschiedliche Strategien verfolgt. Die Integration von Solarzellen in Textilien kann als vorgefertigtes Strukturelement, durch eine direkte Auftragung (Laminieren, Beschichten) oder durch die photovoltaische Funktionalisierung von Fasern erfolgen.

Flexible Solarzellen sind seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung. Vereinzelt wurde mit der kommerziellen

Herstellung begonnen. Bei flexiblen Solarzellen werden die photovoltaisch aktiven Dünnschichtsysteme über physikalische bzw. chemische Gasphasen- oder Druckverfahren auf spezielle Kunststoffträger aufgebracht und das Gesamtsystem anschließend in Permeationsbarrieren (Folie oder Glas) einlaminieren.

Das Vorhaben PhotoTex verfolgt im Gegensatz dazu den neuen Ansatz, als Trägersubstrat für die photovoltaischen Schichtsysteme erstmals flexible Technische Textilien zu verwenden, wie sie u. a. für Planen und Markisen zum Einsatz kommen. Als Voraussetzung für eine gleichmäßige oder strukturierte Applikation der Dünnschichtsysteme auf den textilen Flächen, wurde eine geeignete Substratvorbehandlung/-beschichtung entwickelt.

➤ Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele

Die Kombination innovativer Herstellungs- und Beschichtungsmethoden aus den Bereichen Technische Textilien und Photovoltaik eröffnet erstmals die Möglichkeit, flexible Solarmodule mit neuen Gebrauchseigenschaften zu entwickeln. Hohe mechanische Belastbarkeit und Lebensdauer sowie Flexibilität in der Verarbeitbarkeit sind für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. im Bereich textiles Bauen (Membrandächer, Planen, Sonnenschutz) von Bedeutung und werden mit den angestrebten Ergebnissen realisierbar. Der branchenübergreifende Charakter ist vom Ansatz der Entwicklung bis zu den Zielgrößen für die Endprodukte im Vorhaben enthalten.

Perspektivisch können neue Anwendungsbereiche überall dort entstehen, wo textile Flächen zur Energiege-

winnung zur Verfügung stehen oder feste Module ersetzt werden können. Auch dezentrale und mobile Anwendungen werden von leichten und flexiblen Solarmodulen profitieren. Photovoltaikmodule können in Dimensionen entstehen, die in der textilen Flächenherstellung üblich sind, einhergehend mit einer Reduzierung des Installationsaufwandes. Unternehmen der Textilveredelung und Textilbeschichtung werden neue Geschäftsfelder erschließen und Unternehmen der Solarindustrie ihre Produktpalette anwendungsspezifisch erweitern.

➤ Lösungsansatz

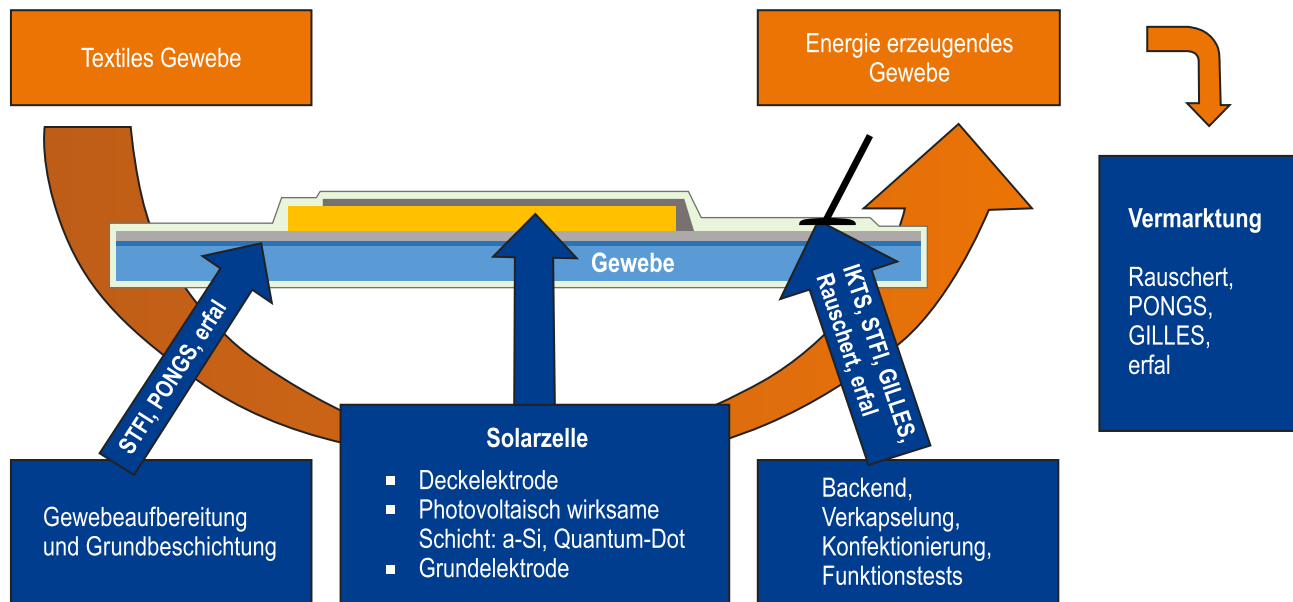


Abbildung 1: Technologisches Grundprinzip des PhotoTex und Mitwirken der Verbundpartner. Quelle: Fraunhofer IKTS

Die Projektidee zielt auf die Veredelung technischer Gewebe hin zu Energie erzeugenden Geweben ab. Hierfür ist es notwendig, die Technischen Textilien mit den physikalisch erforderlichen Schichtsystemen zu versehen.

Im Rahmen des Vorhabens PhotoTex wurde der in *Abbildung 1* gezeigte, prinzipielle Aufbau zugrunde gelegt.

Die Textilien werden in einem ersten Schritt mit einer Ausgleichs- und Glättungsschicht versehen. Diese dient dazu, Unebenheiten, welche durch die Gewebestruktur des Textils vorliegen, einzuebnen. Gleichzeitig dient sie dem Schutz für die im Folgenden abgeschiedenen Schichten vor Umgebungseinflüssen.

Das erste für die Funktion wichtige Schichtelement sind elektrische Leitschichten. Diese werden in Form einer Grundlektrode als elektrisches Anschlusselement für die photoaktiven Schichten verwendet und gleichzeitig für finale Montageprozesse genutzt. Für diese elektrisch leitfähigen Schichten wurden verschiedene physikalische und drucktechnische Abscheidungsverfahren untersucht. Zwischen diesen elektrischen Verbindungselementen werden die photoaktiven Schichten abgeschieden.

Im Rahmen der Vorhabens werden hierfür zwei technische Ansätze verfolgt:

- Entwicklung Silizium-basierter Dünnschichtsolarzellen mittels plasmagestützter Chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD), Physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) und Atomlagenabscheidung (ALD).
- Entwicklung Polymer-basierter Quantum-Dot-Sensitized-Solar-Cells (QDSSCs) mit Hilfe nasschemischer (Spin-Coating, Langmuir-Blodgett, Spray-Coating) und physikalischer Beschichtungsverfahren.

Im Folgenden werden die photoaktiven Schichten drucktechnisch in Form einer Deckelektrode wieder mit elektrischen Leiterzugelementen kontaktiert. Zum Schutz der photoaktiven Elemente wird der gesamte Schichtaufbau mit einer witterungsbeständigen Schutzschicht versehen. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde weiterhin die folgende Verarbeitung der derart prozessierten Technischen Textilien untersucht. Es soll somit sichergestellt werden, dass deren weitere Verarbeitung im textilen Umfeld gegeben ist. Zur Erlangung erster Zuverlässigkeitsergebnisse wurden zudem Bewitterungsversuche im Freifeld vorgenommen.

Konkret wurden im Vorhabenkonsortium arbeits- teilig folgende Einzelpunkte bearbeitet:

- Auswahl Technischer Textilien, die für eine folgende Beschichtung auf der Basis physikalischer Prozesse geeignet sind
- Entwicklung einer geeigneten Substratvorbehandlung/-beschichtung als Voraussetzung für die Applikation der Dünnschichtsysteme sowie der Quantum-Dots auf den textilen Flächen
- Abscheiden der photovoltaisch wirksamen Schichtsysteme
- Entwicklung von witterungsbeständigen, transparenten Schutzschichten für die photovoltaischen Wirkungsschichten
- Untersuchung zur Verarbeitung der veredelten Technischen Textilien
- Auswahl und Durchführung von Funktions- und Beständigkeitstests der im Vorhaben entstehenden Teilsysteme
- Entwicklung von Gerätetechnik und Testverfahren für die komplexe, gebrauchssimulierende Belastung mit gleichzeitiger Funktionsmessung für das Gesamtsystem

➤ Ergebnisse

Im Rahmen der Durchführung erfolgte die Realisierung der photovoltaischen Schichtabscheidung auf Technischen Textilien durch Qualifizierung der einzelnen Prozessschritte und anschließende Zusammenfassung im Aufbau von Komplettdemonstratoren.

Funktionalisierung von Textilien für Dünnschichtprozesse

Die größte technologische Hürde der für Dünnschichtprozesse bisher unzureichenden Oberflächentopografie von Textilien, wurde unter Teilprojektleiterschaft des STFI erfolgreich bearbeitet. Es erfolgte die Integration der notwendigen Einebnungs- und Ausgleichsschichten mittels verschiedener Druck- bzw. Kaschiertechnologien. Als zu beschichtende Gewebe wurden Glasfasergelege und Polyethersulfon erfolgreich validiert. Als topografische Ausgleichswerkstoffe dienten Silikonüberzüge zur direkten Beschichtung im Dünnschichtprozess bzw. Metallfolienkaschierung zur zusätzlichen Integration der elektrisch leitfähigen Grundlektrode.

Dünnschichtprozesse auf Textilien

Durch die beteiligten Forschungseinrichtungen erfolgte auf diese vorbehandelten Textilien die Aufbringung der photovoltaischen Schichten. Am Fraunhofer IKTS wurde dafür die chemische Gasphasenabscheidung (PECVD), physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) und Atomlagenabscheidung (ALD) verwendet. Entwicklungsziel war dabei stets die sowohl großflächige als auch fein strukturierbare Abscheidung aller benötigten Funktionsschichten.

Mittels ALD wurden auf eingeebneten Textilien Permeationsbarrieren eingebracht. Diese dienen zur Minderung der Wassereindiffusion in die elektrisch aktiven Schichten und somit zur Optimierung des Langzeitverhaltens. Die zur Realisierung von photovoltaischen aktiven Dünnschichten auf textilen Trägern erarbeitete Schichtreihenfolge ist in *Abbildung 2* zusammengefasst. Am Fraunhofer IKTS wurde eine Herstellungstechnologie für die einzelnen Schichtlagen entwickelt und qualifiziert.

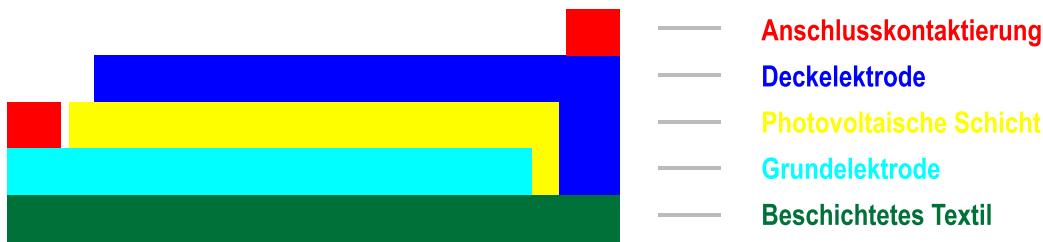


Abbildung 2: Schichtfolge zur Herstellung photovoltaischer Dünnschichten auf textilen Trägern. Quelle: Fraunhofer IKTS

Als geeignete Werkstoffe für die elektrisch leitfähige Grundelektrode wurden im Rahmen einer Literaturrecherche Molybdän und Aluminium ausgewählt. Diese Werkstoffe sind insbesondere im Bereich der Dünnschicht-Photovoltaik auf polymeren Trägern und Glassubstraten weit verbreitet, so dass ein technologischer Anschluss zu im Bereich der Photovoltaik etablierten Technologien gegeben ist. Es erfolgte der Aufbau von textilen Testmustern basierend auf verschiedenen Basiswerkstoffen und unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden mittels DC-Magnetronspütern. Der Abscheidungsprozess wurde dabei anhand elektrischer Kennwerte der flächigen Metallisierung und der topologischen Güte optimiert.

In Folge der thermischen Belastung der Textilien während der Dünnschichtprozesse (Prozesstemperaturen bis 200 °C) kam es zu Vorwölbungen der beschichteten Textilien. Zur Minderung dieser unerwünschten Effekte wurde im Rahmen des Konsortiums eine Gewebe-, Einebnungsschicht- und Prozessführungsoptimierung durchgeführt. Insbesondere die Verwendung von Glasfasergelegen erbrachte eine hohe geometrische Stabilität während der gesamten Prozessführung. Es konnte eine stabile Aluminium-Dünnschichtabscheidung auf textilen Trägern mit akzeptablen Widerstandswerten erreicht werden.

Die Erhöhung der Widerstände gegenüber Glasreferenzsubstraten resultiert aus der rauerer Oberflächentextur der Textilien und konnte über die Dicke der abgeschiedenen Aluminium-Schicht optimiert werden. Der Einsatz von Molybdän erwies sich als nicht zielführend. Die Verwendung von Aluminium wurde als Grundelektrode für alle folgenden Prozesse festgelegt. Für die Deckelektrode mussten elektrisch leitfähige, aber für das Sonnenspektrum transparente Werkstoffe qualifiziert werden. Hierfür wurde entsprechend Literaturrecherche ein Indium-Zinn-Oxid (ITO) festgelegt. Dieses wurde mittels DC-Magnetronspütern abgeschieden und hinsichtlich elektrischer Kennwerte untersucht.

Es erfolgte die Abscheidung photovoltaisch aktiver amorpher Siliziumschichten mit unterschiedlicher Dotierungsreihenfolge mittels PECVD-Abscheidung auf textile Träger. Diese Ebene bildet die eigentliche photovoltaisch aktive Funktion und wurde hinsichtlich Schichtdicken der einzelnen n-i-p-Schichten optimiert. Ziel war es insbesondere einen homogenen Schichtdickenaufbau zu realisieren. Anfänglich kam es dabei im Übergangsbereich zwischen zu beschichtendem Element und Maskierungs- bzw. Fixierungselement zu einem inhomogenen Schichtauftrag. Als Lösungsansatz erfolgt eine umfassende Qualifizierung verschiedener Maskierungstechnologien, welche zugleich eine Fixierung und Spannung des Textils während der Prozessführung realisieren können. Die elektrische Aktivität der einzelnen abgeschiedenen Schichten konnte an Testmustern mit Grund- und Deckelektrode nachgewiesen werden. Auf Basis dieser positiven Einzelschichtergebnisse konnte die Überführung in Systemdemonstratoren durchgeführt werden.

Präparation flexibler Quantum-Dot-Solarzellen

Am Fraunhofer ENAS wurden die Quantum-Dot-Solarzellen mittels nasschemischer und physikalischer Abscheidungsverfahren aufgebaut. Für das Vorhaben wurden 2 Schichtsysteme ausgewählt, welche bei Temperaturen unter 150 °C prozessiert werden konnten. Zu den Schichtsystemen gehörten der hybride (I) und der anorganische Schichtstapel (II):

- I. ITO/PEDOT:PSS/Poly(3-hexylthiophen-Quantum-Dots/Zinkoxid/Aluminium
- II. ITO/Zinkoxid/Quantum-Dots/Molybdänoxid/Gold

Diese Schichtstapel mussten aufgrund der Intransparenz des Substrates umgedreht werden, da die Beleuchtung

durch die transparente Elektrode erfolgen muss. Dies ist in der Regel ITO oder FTO. Im Vorhaben ergaben sich durch diesen Prozess folgende Schichtreihenfolgen auf Textil:

I-a Textil/Gold/Molybdänoxid/Quantum-Dots/Zinkoxid/Deckelektrode

II-a Textil/Aluminium/Zinkoxid/Poly(3-hexylthiophen)-Quantum-Dots/Deckelektrode

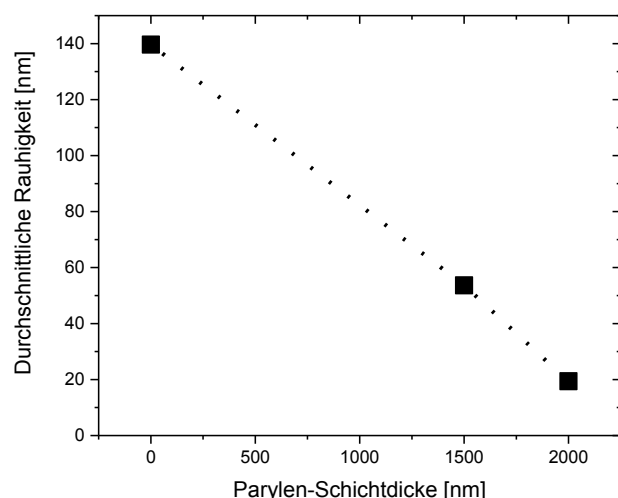


Abbildung 3: Durchschnittliche Rauigkeit der verwendeten Textil-Substrate in Abhängigkeit der Parylen-Schichtdicke. Die Rauigkeit konnte unter 20 nm gebracht werden. Quelle: Fraunhofer ENAS

Aufgrund der für das Vorhaben ausgewählten nanometerdicken Schichtsysteme mussten weitere Planarisierungsmaßnahmen vorgenommen werden. Hierzu wurde Parylen mittels Gasphasenreaktion abgeschieden, so dass die Rauigkeit auf unter 20 nm reduziert werden konnte (Abbildung 3).

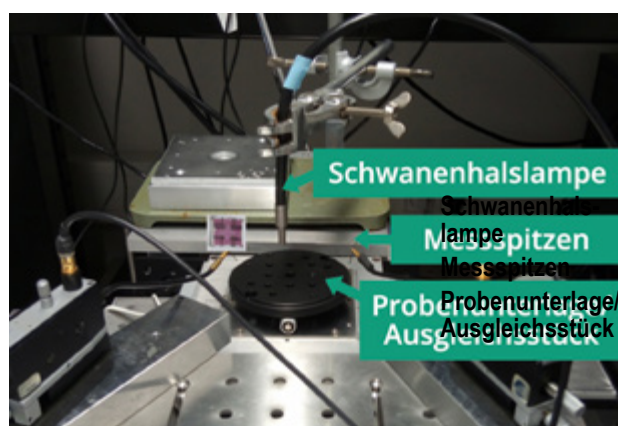


Abbildung 4: Setup am Fraunhofer Institut für Elektronische Nanosysteme (ENAS) zur Bestimmung der Solarzellenkennlinien. Foto: Fraunhofer ENAS

Die Einzelschichten wurden mittels verschiedener Verfahren realisiert. Die Grundelektroden Gold und Aluminium wurden mit Hilfe des Sputterprozesses aufgetragen. Im Schichtaufbau **a** wurde Molybdänoxid sowohl über den Aufdampf als auch aus einem Sol heraus abgeschieden. Die photoaktiven Quantum Dot-Schichten sowie die Zinkoxid-Nanopartikelschicht wurden mittels Spin-Coating auf den Proben verteilt. Der Schichtstapel schloss mit einer Deckelektrode, bestehend aus dem Schichtsystem Molybdänoxid/Gold-Silber/Molybdänoxid, ab, welche mittels thermischer Verdampfung erzeugt wurde. Die Strom-Spannungs-Kennlinien wurden unter Beleuchtung mit einer Schwanenhalslampe aufgenommen. Die Lampenleistung betrug 0,86 mW/mm².

Nachstehend sind beispielhaft Solarzellenkennlinien der Schichtsysteme auf Textil aufgeführt:

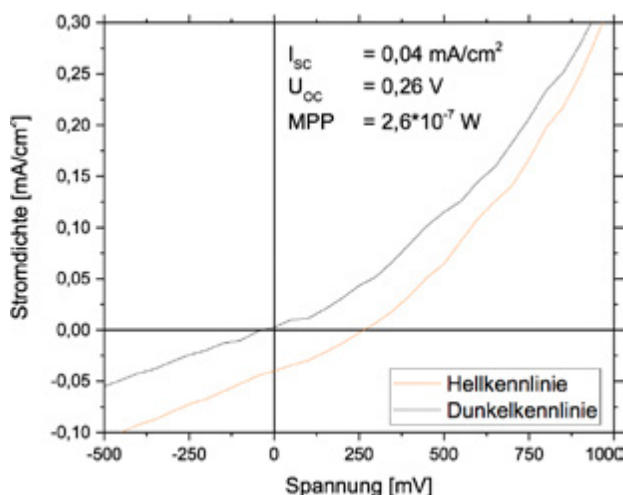
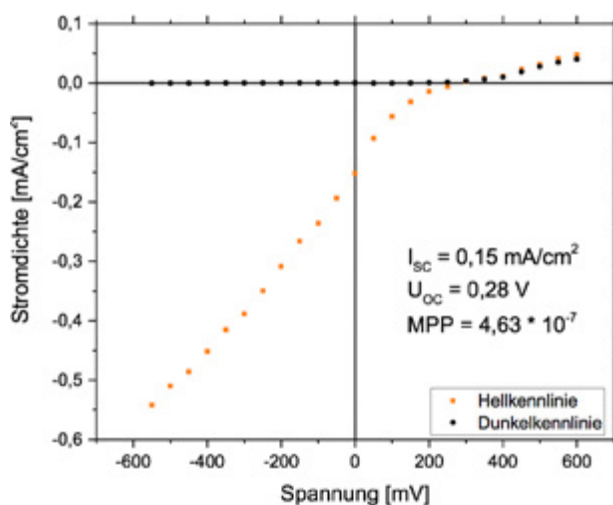


Abbildung 5: Solarzellenkennlinien der Schichtstapel I-a (links) und II-a (rechts) auf Textil. Quelle: Fraunhofer IKTS

Der Transfer auf das Textil konnte trotz vielfacher Herausforderungen erfolgreich umgesetzt werden. In weiterführenden Projekten werden die Solarzeleigenschaften weiter optimiert.

Systemdemonstratoren

Die erfolgreichen Ergebnisse an Einzelschichten wurden zum Aufbau von Systemdemonstratoren zusammengefasst und anhand der Systemergebnisse optimiert. Dazu erfolgte der Systemaufbau inklusive Anschlussmontage auf Technischen Textilien und Referenzsubstraten aus Glas. Zur Charakterisierung der photovoltaischen Eigenschaften wurde ein Effizienzmessplatz am Fraunhofer IKTS modifiziert. Dieser bietet eine konstante Bestrahlung mit 1000 W/m^2 unter Lichtspektrum von AM1,5. Basisprinzip der Messung ist eine konstante Bestrahlung des Testkörpers bei zeitgleicher Anlegung einer Spannung bzw. eines Stromes zur Abrasterung der Strom-Spannungskennlinie. Die jeweilig resultierende Messgröße (Strom bei Spannungsaufprägung, Spannung bei Stromvorgabe) wird dokumentiert. Aus der vorgegebenen Größe und dem resultierenden Messwert werden die Strom-Spannungs-Kennlinien gebildet. Anhand dieser können die elektrischen Kenngrößen Effizienz (Verhältnis von Maximalleistung je Flächeneinheit zu Bestrahlungsleistung), Serienwiderstand (Anstieg der Kurve bei Leerlaufspannung), Parallelwiderstand (Anstieg der Kurve bei Kurzschlussstrom) und Füllfaktor (Verhältnis aus Maximalleistung zum Produkt aus Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung) berechnet werden.

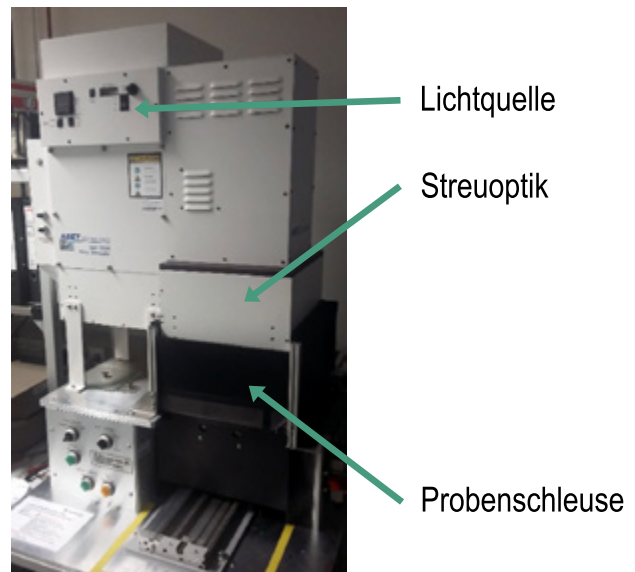


Abbildung 6: Sonnensimulator zur Charakterisierung von Solarzellen mit geringen Stromstärken. Foto: Fraunhofer IKTS

Es wurde im Rahmen der Durchführung eine Kleinserie von 20 Stück der Systemdemonstratoren in Kooperation zwischen allen Vorhabenpartnern aufgebaut und qualifiziert. Der technologische Nachweis der Prozessierbarkeit photovoltaisch aktiver Schichten auf Technischen Textilien konnte anhand dieser Systemdemonstratoren erbracht werden. Die aktive Solarzellfläche beträgt dabei 250 mm^2 .

Die Qualität der hergestellten Schichten wurde anhand elektrischer und präparativer Methoden beurteilt. Insbesondere war dabei die Mikrorissbildung im Bereich der amorphen Siliziumschichten Forschungsschwerpunkt.

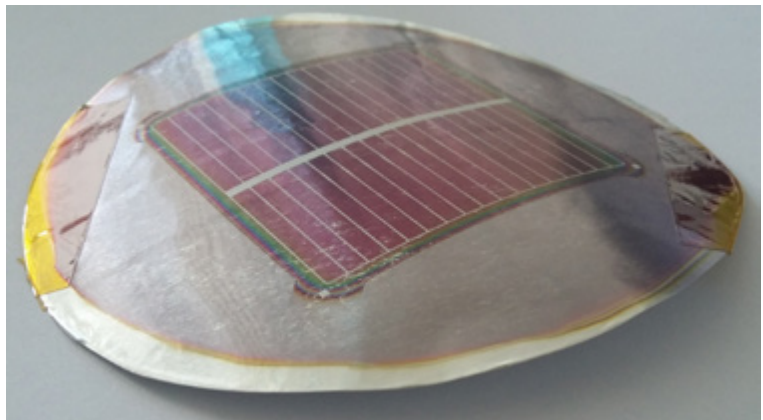
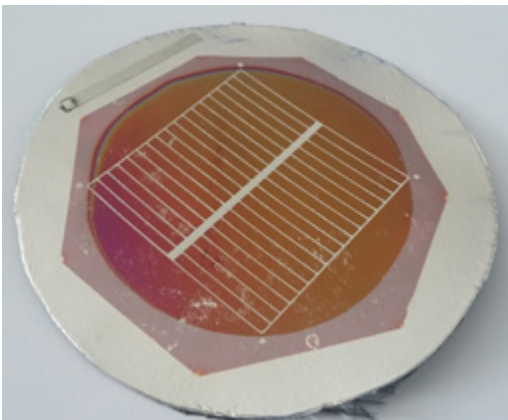


Abbildung 7: PhotoTex-Komplettsysteme. Links: kreisförmige photovoltaische Struktur mit siebgedruckten Stromabgriffen. Rechts: quadratische photovoltaische Struktur mit siebgedruckten Stromabgriffen und Verkapselungsschichten. Fotos: Fraunhofer IKTS



Abbildung 8: Optimierungshistorie bei der Technologieüberführung der Dünnschichtabscheidung auf textile Trägersubstrate. Links: Ausgangssituation bei Schichtabscheidung auf Glas-substrate. Mitte: Schichtabscheidungen mit erhöhten Schichtstärken führten zu starker Rissbildung im Dünnschichtbereich. Rechts: optimierter Schichtabscheidungsprozess mit nur noch seltener Mikrostrukturrisbildung. Quelle: Fraunhofer IKTS

Durch weitere Optimierung der Prozessführung konnte die Schichtqualität signifikant verbessert werden. Zusätzlich

wurden Aspekte der Anschlussmontage eingehender berücksichtigt.

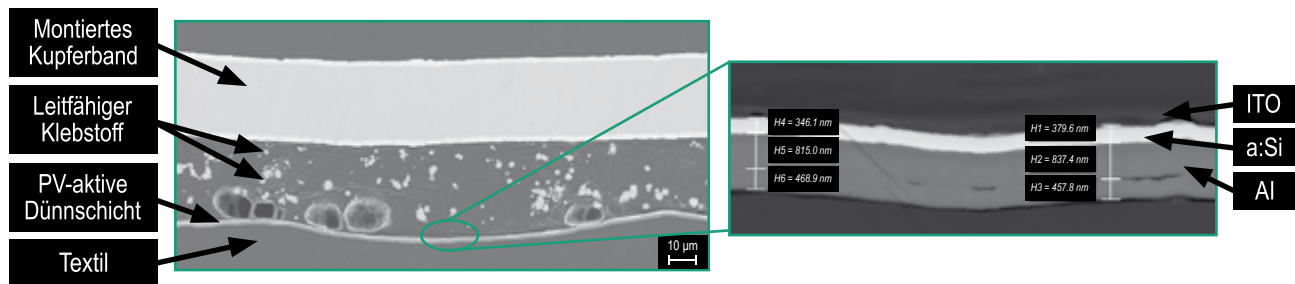


Abbildung 9: Querschliffe optimierter PhotoTex-Komplettsysteme. Links: Querschliff durch ein mittels Klebstoffkontaktierung gefügtes PhotoTex. Rechts: Vergrößerte Detaildarstellung des Dünnschichtaufbaus auf einer textilen Oberfläche. Quelle: Fraunhofer IKTS

Es konnte gezeigt werden, dass die defektarme Dünnschichtabscheidung auf geometrisch nicht vollständig ebene Textilien technologisch möglich ist. Zur weiteren Verbesserung des Gesamtaufbaus wurde in Kooperation mit den Vorhabenpartnern die Möglichkeit zum Einsatz von folienkaschierten Textilien qualifiziert. Der technolo-

gische Ansatz dabei ist, dass eine metallische Folie als Kaschierungslage auf dem Textil die Dünnschicht-Aluminium-Elektrode vollständig ersetzt (Erhöhung Stromtragfähigkeit) und zugleich für eine erhöhte Ebenheit der Abscheidungs Oberfläche sorgt.



Abbildung 10: Querschliffe von Metallfolien-kaschierten PhotoTex Komplettsystemen. Links: Detailausschnitt der Dünnschichtabscheidung auf Folienkaschierung. Rechts: Querschnitt des Gesamtsystems. Quelle: Fraunhofer IKTS

Die Qualifizierung der Anschlussmontagearten fokussierte sich entsprechend Projektplanung auf die Klebstoffmontage von Metallbändern und den Siebdruck leitfähiger Schichten. Die Qualifizierung der Klebstoffmontage mittels kommerzieller Klebebänder für photovoltaische Applikationen ergab ein akzeptables Festigkeitsbild, aber eine

reduzierte elektrische Leitfähigkeit in Folge des geringen Feststoffgehaltes von leitfähigen Partikeln innerhalb des Klebstoffes. Dieser zusätzliche Widerstand erhöht den inneren Serienwiderstand des Komplettsystems und vermindert dadurch die Effizienz des Komplettsystems.

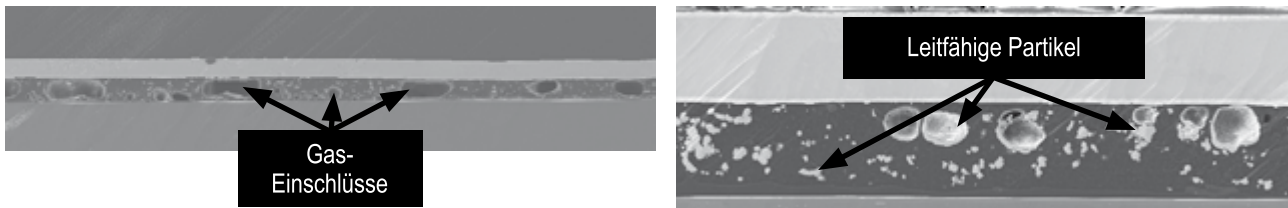


Abbildung 11: Querschliffe von Metallfolien-kascherten PhotoTex-Komplettsystemen. Links: Detailausschnitt der Dünnschichtabscheidung auf Folienkaschierung. Rechts: Querschnitt des Gesamtsystems. Quelle: Fraunhofer IKTS

Zusätzlich konnte nach mechanischer Auflamination der Klebebänder ein erhöhter Anteil an Voidbildung innerhalb der Klebstoffmatrix detektiert werden. Dieser Störstellenanteil liefert keinen Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit und mindert somit zusätzlich die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Zugleich stellt die Klebstoffmontage mittels auflaminierter Drahtelementen ein kostengünstiges Hochdurchsatzverfahren dar.

Der Siebdruck hochgefüllter Niedertemperaturpasten stellt eine technologische Alternative zur Klebstoffmontage dar. Dabei wird das pastöse Medium durch planaren Siebdruck auf das textile Substrat lokal maskiert überführt und anschließend im Temperaturbereich zwischen 80 – 200 °C gehärtet. Als Ergebnis verbleibt dauerhaft auf dem Substrat eine strukturierte leitfähige Schicht, welche z. B. mittels Lötmontage gefügt werden kann.

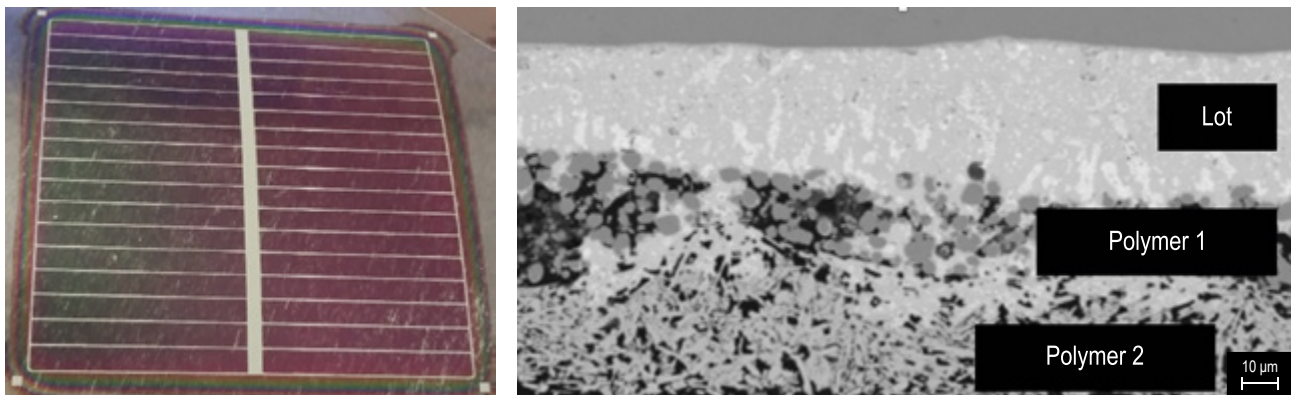


Abbildung 12: Siebgedruckte Anschlussbereiche bestehend aus Niedertemperatur-Dickschichtpasten. Links: Drucklayout bestehend aus Sammelfingern und Kontaktierungs-Busbar auf einem PhotoTex. Rechts: technologisch notwendiger Mehrschichtaufbau zur Realisierung von Lötmontagen. Quelle: Fraunhofer IKTS

Die elektrische Leitfähigkeit von siebgedruckten Niedertemperaturleitpasten ist gegenüber den Klebebändern auf Grund des erhöhten Metallpartikelanteils signifikant erhöht. Zugleich ergibt sich die technologische Herausforderung, dass Niedertemperaturleitpasten nur eingeschränkt lötfähig sind. Durch den Wärmeeintrag und die chemische Aggressivität der verwendeten Flussmittel bei der Lötung kommt es zur Anlösung der Metallpartikel in der Polymermatrix. Zur Minderung dieses Effektes müssen hochleitfähige Niedertemperaturpasten (Abb. 12 rechts Polymer 2)

durch lötwärmeresistente Schichten (Abb. 12 rechts Polymer 1) abgedeckt werden. Somit ist dieses Kontaktierungskonzept kostenintensiver.

Zugleich ergeben sich durch den Siebdruck ästhetisch relevante Eigenschaften, da unmittelbar auf das Textil neben den rein elektrischen aktiven Bereichen auch optische Markierungen implementiert werden können. Darunter fallen z. B. Firmenlogos, sich wiederholende Musterungen oder andere ästhetische Aspekte.

➤ **Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung**

Entsprechend dem Verwertungsplan erfolgt die Verwertung durch Dienstleistungen oder nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsprojekte.

Durch das im Vorhaben erzeugte technische Know-how in der Bearbeitung und Funktionalisierung von Technischen Textilien und auch deren Weiterverarbeitung konnten die Partner zum Vorhabenende ihre Marktposition als Entwicklungspartner für derartige Produkte ausbauen. Die wirtschaftliche Verwertung erfolgt in Form von Her-

stellungs- und Analysedienstleistungen. Diese werden industriell seit der Schlussphase des Fördervorhabens regelmäßig genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Dienstleistungsportfolio auch zukünftig umfassend industriell in Anspruch genommen wird. Zur wissenschaftlichen oder wirtschaftlichen Verwertung der Ergebnisse werden gegenwärtig Vorbereitungen für weitere Fördervorhaben getroffen. Insbesondere wird dabei die umfassende Funktionalisierung von Textilien mittels Metallisierungsabscheidung fokussiert.

➤ **Ausblick**

Die im Vorhaben bearbeiteten grundlegenden Aspekte sind ein idealer Ausgangspunkt für eine Weiterentwicklung der textilbasierten Solarzellen. Die Arbeiten müssen nach Vorhabenabschluss weitergeführt werden, um die Weiterentwicklung der textilbasierten Solarzelle abzusichern. Zukünftige Hauptarbeitsschwerpunkte sind z. B. die Steigerung des Wirkungsgrades, aber auch die Entwicklung eines effizienten Serienfertigungsprozesses für größere Flächen. Die Einbettung in das Konsortium futureTEX stellt dabei sicher, dass eine langfristige und vertrauensvolle Partnerschaft zwischen den Vorhabensbeteiligten entlang der Wertschöpfungskette entstehen konnte und kann. Durch die enge Verknüpfung zwischen den Partnern des Konsortiums (Entwicklungsdienstleister, Technologieunternehmen, Endanwender) ergeben sich

mannigfaltige Kooperationsmöglichkeiten auf einer vertrauensvollen Basis. Die im Konsortium entwickelten Produktideen können auf Basis der Technologieuntersuchungen zu marktreifen Lösungen weiterentwickelt werden.

Im Rahmen der Verwertung der Vorhabenergebnisse wurden die wissenschaftlichen Vorhabenergebnisse und -erkenntnisse im Rahmen verschiedener Beiträge auf geeigneten Tagungen und Konferenzen vorgestellt. Auf diese Weise wurden schon während der Vorhabenlaufzeit vielfältige Möglichkeiten für eine fachliche Diskussion genutzt. Diese Aktivitäten werden auch nach Vorhabenabschluss kontinuierlich fortgesetzt.

➤ Impressum

Konsortialführer Projekt futureTEX:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
An-Institut der Technischen Universität Chemnitz
Geschäftsführung: Dipl.-Ing.-Ök. Andreas Berthel |
Dr.-Ing. Yves-Simon Gloy

Postanschrift:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Postfach 13 25
09072 Chemnitz

Besucheradresse:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Annaberger Straße 240
09125 Chemnitz

Kontakt:

Projektleitung: Dirk Zschenderlein
E-Mail: dirk.zschenderlein@stfi.de
Tel.: +49 371 5274 283
Fax: +49 371 5274 153
www.futuretex2020.de

Verbundkoordinator Umsetzungsvorhaben PhotoTex:

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Lars Rebenklau
Tel.: +49 351 2553-7986
Fax: +49 351 2554-232
E-Mail: lars.rebenklau@ikts.fraunhofer.de

Lektorat und Gestaltung:

P3N MARKETING GMBH
Bernhardstraße 68
09126 Chemnitz
Tel.: +49 371 5265 380
Fax: +49 371 5265 388
E-Mail: info@p3n-marketing.de

