



**ColorSol -
Nachhaltige
Produktinnovationen
durch Farbstoffsolarzellen**

Schlussbericht des Forschungsprojekts ColorSol[®] – Nachhaltige Produkt- innovationen durch Farbstoffsolarzellen

Claus Lang-Koetz
Andreas Hinsch
Henning Brandt
Severin Beucker
Klaus Fichter
Sven Koenig
Michael Klitsch
Thomas Schubert
Ibrahim Samak

Stuttgart, Juni 2009

Teilprojekt 1: Leitprojekt

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart und
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg
FKZ 01 RI 05211

Teilprojekt 2: Zukunftsmärkte für Solarinnovationen,
Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, Berlin, FKZ 01 RI 05212

Teilprojekt 3: Entwicklung von Druckpasten
Pröll KG, Weißenburg i. Bay., FKZ 01 RI 05213

Teilprojekt 4: Entwicklung von Anwendungsfeldern für Farbstoffsolarzellen
Engco Advanced Technologies GmbH, Stuttgart, FKZ 01 RI 05214

Teilprojekt 6: Entwicklung ressourceneffizientes Produktionsverfahren
BGT Bischoff Glastechnik AG, Bretten, FKZ 01 RI 05216

- unter Mitarbeit des Bundesverband Deutscher Fertigungsbauer e. V. (BDF) -

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Inhaltsverzeichnis

Teil I:	Kurzdarstellung des Vorhabens	6
1	Aufgabenstellung.....	6
2	Voraussetzungen und Beschreibung des Vorhabens	8
2.1	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
2.2	Beschreibung des Vorhabens	9
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	12
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	14
4.1	Farbstoffsolarzellen	14
4.2	Anwendungsfelder.....	17
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	19
Teil II:	Darstellung der Ergebnisse, des Nutzen und des Fortschritts sowie entsprechende Verwertung	21
1	Modul Innovations- und Technikanalyse	21
1.1	Arbeitspaket 1: Technologie- und Produkt-Roadmapping.....	21
1.2	Arbeitspaket 2: Lebenszyklusanalyse für ausgewählte Anwendungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine Integrierte Produktpolitik.....	27
1.3	Arbeitspaket 3: Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft.....	37
2	Modul Kooperative Technologieentwicklung	41
2.1	Übersicht über das Modul Kooperative Technologieentwicklung	41
2.2	Arbeitspaket 4: Entwicklung von Druckpasten für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen	43
2.3	Arbeitspaket 5: Entwicklung und Optimierung des Herstellungsverfahrens von Elektrolyten	53
2.4	Arbeitspaket 6: Entwicklung eines ressourceneffizienten Produktionsverfahrens für Farbstoffsolarzellen	69
2.5	Arbeitspaket 7: Entwicklung von Anwendungsfeldern für Farbstoffsolarzellen	80

2.6	Arbeitspaket 8: Innovationskooperation bei der Technologie- und Produktentwicklung	88
2.7	Solare Charakteristik der Module und Outdoor-Tests	89
3	Modul Ergebnistransfer	91
4	Literatur	97
5	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung der Projektergebnisse	99
6	Bekannt gewordener Fortschritt im Bereich Farbstoffsolarzellen bei anderen Stellen.....	101
7	Veröffentlichungsliste	102

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Wertschöpfungskette Farbstoffsolarzellen.....	11
Abbildung 2: Aufbau des Projekts ColorSol (Module und Arbeitspakete).....	13
Abbildung 3: Kooperationsmatrix.....	14
Abbildung 4: Herstellungsprozess eines Farbstoffsolarzellen-Moduls mit Glaslotversiegelung. 16	
Abbildung 5: Prognose zukünftiger Produktionskapazitäten unterschiedlicher PV- Technologien (eigene Darstellung nach Daten von Hoffmann 2004a: 14).....	22
Abbildung 6: Konzept der Umweltwirkungsbewertung.....	29
Abbildung 7: Herstellung von Farbstoffsolarmodulen.....	42
Abbildung 8: Rührwerkskugelmühle.....	45
Abbildung 9: Dreiwalzenstuhl.....	45
Abbildung 10: Dissolver.....	46
Abbildung 11: Produktion der ColorSol®-Pasten.....	47
Abbildung 12: Partikeldurchmesser vs. Mahldauer.....	47
Abbildung 13: Der Transparenzgrad steigt mit zunehmender Desagglomeration.....	48
Abbildung 14: Partikeloberfläche vs. Durchmesser.....	48
Abbildung 15: Rotations-Sprungversuch 3ITT.....	50
Abbildung 16: REM-Aufnahmen, Fraunhofer-ISE (li.o.: Rissbildung und Ablösung der TiO ₂ - Schicht von TCO- Oberfläche; li.u.: tolerierbare Rissbildung; re: Idealzustand).....	51
Abbildung 17: ColorSol-Pasten in 1 Liter-Gebinden (v.l.n.r.: Glaslot-, TiO ₂ -, ZrO ₂ -Paste).....	52
Abbildung 18: Einstufige Synthese von PMIM I (oben) und EMIM OTf (unten); a) THF, 50°C, 24h, b) 0°C, 2h.....	55
Abbildung 19: Zweistufige Synthese von EMIM SCN und EMIM OTf; a) Acetonitril, Raumtemp., 24h, b) NH ₄ SCN, CH ₂ Cl ₂ , 24h, c) MeOTf, 20°C.....	56
Abbildung 20: Kationen-Chromatogramme von a) Reaktionsmischung, b) reinem Methylimidazole und c) reinem PMIM I.....	57
Abbildung 21: Chromatogramme zweistufige EMIM OTf Synthese; a) zweistufige Synthese (0.27% Halogenid), b) zweistufige Synthese (<250 ppm Halogenid), c) einstufige Synthese (<100ppm Halogenid).....	59
Abbildung 22: Chromatogramme zweistufige EMIM SCN Synthese; a) 1.1 % Bromid, b) 0.13% Bromid.....	61
Abbildung 23: Cyclovoltamogramme ionischer Flüssigkeiten a) PMIM I, b) HMIM I und c) EMIM OTf (Scanrate 50 mV/s, T =25 °C).....	63
Abbildung 24: Umsatz-Zeit-Verläufe der PMIM I-Synthese bei verschiedenen Temperaturen 66	
Abbildung 25: kontinuierlicher Reaktor für die Synthese von PMIM I.....	66
Abbildung 26: Zuschnitt des Glases.....	71
Abbildung 27: Einbringen der Löcher mit Wasserstrahl.....	72
Abbildung 28: Reinigung der beschichteten Gläser.....	72
Abbildung 29: Druck der Silberleitpaste.....	74
Abbildung 30: Druck der Titandioxid-Paste.....	74
Abbildung 31: Druck der Platinpaste.....	75

Abbildung 32: Druck der Glaslotpaste	75
Abbildung 33: Gefustetes, noch unbefülltes Farbstoffsolarzellen-Modul	76
Abbildung 34: Laminiertes, noch unbefülltes Farbstoffsolarzellen-Modul.....	77
Abbildung 35: Photo eines gefusteten 60 cm x 100 cm Farbstoffsolarmoduls mit eingefärbter und Elektrolyt befüllter Zelle	78
Abbildung 36: Maschine zur automatisierten Befüllung von Farbstoffsolarmodulen während des Aufbaus in der Werkstatt des Fraunhofer IAO	80
Abbildung 37: Beispiele für Anwendungsideen für Farbstoffsolarzellen aus einer durchgeführten Designstudie.....	83
Abbildung 38: Darstellung von Anwendungsszenarien aus dem Lead User Workshop	84
Abbildung 39: Ausgewähltes Design für das Prototypenpanel.	85
Abbildung 39: Foto des am Fraunhofer ISE hergestellten Prototypenpanel zur Farbstoffsolarzellenanwendung in Fassadenelementen. Die Abmessungen sind 2m x 0.7 m pro Einzelpanel. (Foto: Zuckerfabrik Fotodesign).....	87
Abbildung 40: Photo eines Outdoorteststandes am Fraunhofer ISE zur Vermessung von Farbstoffsolarmodulen (im Vordergrund) unter verschiedenen Orientierungen	89
Abbildung 41: Relativer Wirkungsgrad, d.h. relative solare Leistung, von im Projekt ColorSol hergestellten Farbstoffsolarmodulen der Größe 30 cm x 30 cm als Funktion des Einstrahlungswinkels. Der Vergleich zu einem kommerziellen Solarmodul mit Zellen aus kristallinem Silizium ist gezeigt.	90

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Kriterienraster für die Bewertung von Anwendungsszenarien	23
Tabelle 2: Bandbreite der wichtigsten Kenngrößen der Szenarien.....	34
Tabelle 3: Vergleich herkömmlicher Photovoltaik-Technologie mit FSZ (Werte für FSZ: eigene Berechnung, Werte für andere Technologien: Quaschnig 2008)	34
Tabelle 4: Elektrolytzusammensetzungen	64
Tabelle 5: kontinuierliche PMIM I-Synthese	67

Teil I: Kurzdarstellung des Vorhabens

1 Aufgabenstellung

Die Gewinnung von sauberer und nachhaltiger Energie ist ein zentrales Zukunftsthema. Als Technik zur dezentralen Elektrizitätsbereitstellung aus dem ubiquitär verfügbaren Energieträger Sonnenlicht stellt die Photovoltaik eine besonders attraktive und nachhaltige Möglichkeit dar, elektrische Energie auch in weit abgelegenen Gebieten oder mobilen Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Die auf dünnen Mischschichten basierende Technologie der Farbstoffsolarzellen ist dabei sowohl unter produktionstechnischen als auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten von besonderem Interesse, da sie aufgrund einfacher Herstellungsverfahren über ein hohes Potential zur Ressourcenschonung und zur internationalen Verbreitung verfügt. Die Marktpreise für konventionelle Solarzellen konnten in den letzten Jahren, vor allem durch die photoelektrische Effizienzsteigerung und eine zunehmende Automatisierung und Massenproduktion, deutlich reduziert werden. Ein mögliches Potential zur weiteren Senkung der Materialkosten ergibt sich aus dem Einsatz der neuen Technologie der Farbstoffsolarzellen (Frost&Sullivan 2003a).

Farbstoffsolarzellen sind elektrochemische Dünnschichtsolarzellen. Sie verfügen über nanokristalline Elektroden aus Titandioxid, in die eine Schicht aus organischen Farbstoffen auf der Basis von Ruthenium eingebettet ist. Damit kann eine höhere Lichtausbeute und ein besserer Elektronentransfer vom Lichtabsorber zur Elektrode erreicht werden. Im Labor konnten in Testzellen und Standard Test Conditions (STC) solare Wirkungsgrade bis 11 % erreicht werden. Diese Werte liegen zwar unter denen kommerziell verfügbarer Siliziumsolarzellen, aufgrund ihrer höheren Empfindlichkeit für Streulicht und ihrer größeren Temperaturtoleranz, erzielen Farbstoffsolarzellen jedoch im Tagesverlauf Ausbeuten, die denen von anderen Dünnschichttechniken vergleichbar sind (siehe Hinsch et al. 2009). Mittel- bis langfristig wird jedoch davon ausgegangen, dass sich der solare Wirkungsgrad von Farbstoffsolarzellen noch deutlich erhöhen lässt.

Für Farbstoffsolarzellen ergeben sich aufgrund ihrer Eigenschaften wie Farbigkeit und Semitransparenz vollständig neue Anwendungsgebiete. Ihre Produktion ist im Vergleich zur Siliziumtechnik kostengünstiger, da wesentlich einfachere Herstellungsverfahren aus der Siebdrucktechnik zur Anwendung kommen. Zudem erlauben Farbstoffsolarzellen größere Freiheitsgrade für das Design (Farb- und Formgebung) von Solarmodulen.

Eine erste Lebenszyklusbetrachtung von Farbstoffsolarzellen zeigte, dass ihre energetische Amortisationszeit halb so groß wie die von konventionellen

Solarzellen ist (vgl. Dt. Bundestag 2004, 163 ff). Durch einen großflächigen Einsatz von Farbstoffsolarzellen- und organischen Solarzellen¹ könnten somit erhebliche Energieeinsparungen erreicht werden. Die erwarteten geringen Produktionskosten können zudem die Verbreitung von photovoltaischen Anwendungen erhöhen und damit die Nutzung regenerativer Energien insgesamt stärken. Auch werden sozial positive Auswirkungen erwartet, da durch günstigere Anschaffungspreise z.B. Nutzer in Entwicklungs- und Schwellenländern gewonnen werden können, die bisher keinen Zugang zu einer günstigen und umweltfreundlichen Energieversorgung hatten.

Mögliche Anwendungen für Farbstoffsolarzellen ergeben sich zum einen aus bereits bekannten Anwendungsfeldern der Solarenergie, wie dezentraler Energieversorgung von elektrischen Anlagen, Geräten und Sensorsystemen, Lichtquellen, Generatoren, Solarfenstern und Solarplanen für Gebäudefassaden etc. Zum anderen sind neue Anwendungsgebiete z.B. im Bereich der Konsumerelektronik denkbar, die von den besonderen Merkmalen dieser Solarzellen, wie geringe Kosten, umweltfreundliche Materialien, leichte Austausch- und Handhabbarkeit, Gestaltungsfreiheiten im ästhetischen Sinne, profitieren können.

Erfahrungen der letzten Jahre mit dem Transfer neuer Technologien in Praxisanwendungen (z.B. UMTS oder Digitales TV) haben zudem gezeigt, dass es nicht ausreicht, bestehende Ansätze der Kommerzialisierung traditioneller Technologien (z.B. Maschinenbau) auf Innovationen, Anwendungen und Technologiezyklen aus dem Bereich der neuen Technologien zu übertragen. Es ist vielmehr notwendig, neue Technologien durch prototypische Anwendungen zu vermitteln (d.h. kommunikativ verfügbar zu machen) und Szenarien zu entwickeln, mit denen sowohl Anwendungsentwickler als auch Endanwender sich entlang zunehmender Technologiereife kommunikativ einbinden lassen.² Daher sollen im Vorhaben ColorSol gezielt Szenarien für die Anwendung der Technologie der Farbstoffsolarzellen in Anwendungsfeldern zusammen mit potenziellen Nutzern entwickelt werden.

Im Rahmen des Vorhabens sollten Schwerpunkte auf die folgenden drei Anwendungsfelder von Farbstoffsolarzellen gelegt werden:

1. Solarpanele für Gebäudefassaden,
2. netzunabhängige Anwendungen für Photovoltaik-Module,
3. Autarke Sensoren für die Umwelttechnik.

¹ Organische Solarzellen sind eine den Farbstoffsolarzellen verwandte Technologie und basieren auf Polymeren. Sie standen aber nicht im Fokus dieses Vorhabens.

² Vgl. Cohen u. Levinthal (1990) zu ‚Absorptive Capacity‘ sowie Nelson (2003) zum Problem der zunehmenden Entkopplung von sozio-kultureller und techn(olog)isch-naturwissenschaftlicher Expertise.

Dabei wurde während der Projektarbeiten der Fokus insbesondere auf Solarpaneele für Gebäudefassaden gelegt.

Bezogen auf die drei Anwendungsfelder wurden die zentralen Ziele des Vorhabens wie folgt definiert:

1. Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie zur Erweiterung bestehender und zur Erschließung neuer Anwendungsfelder sowie zur Erreichung einer verbesserten energetischen Amortisationszeit
2. Entwicklung eines auf der Siebdrucktechnik basierenden ressourceneffizienten Produktionsverfahrens für Farbstoffsolarzellen unter Verwendung umweltfreundlicher Chemikalien
3. Entwicklung von Anwendungsszenarien und einer Vermarktungsstrategie für die Anwendung von Farbstoffsolarzellen in Fassaden, für netzunabhängige Anwendungen und für autarke Sensoren in der Umwelttechnik
4. Erhöhung der Richtungssicherheit der Entwicklungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung durch Umweltwirkungsabschätzungen sowie die Ermittlung wirtschaftlicher und entwicklungspolitischer Potentiale
5. Entwicklung von Gestaltungskonzepten für eine umweltgerechte Produktentwicklung (z. B. recyclinggerechte Konstruktion und Herstellung)

Durch die Erreichung der genannten Ziele sollen Umweltbelastungen reduziert, neue Märkte und Arbeitsplätze geschaffen und mit Blick auf Anwendungen in Entwicklungs- und Schwellenländern entwicklungspolitische Ziele einer nachhaltigen Entwicklung erreicht werden.

2 Voraussetzungen und Beschreibung des Vorhabens

2.1 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Bezug auf die oben dargestellten Ziele des Projekts bestanden zu Beginn des Vorhabens folgende Voraussetzungen (vgl. auch Stand des Wissens in Kap. 4):

Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie und Entwicklung eines ressourceneffizienten Produktionsverfahrens

Zu Beginn des Vorhabens konnten am ISE Farbstoffsolarmodule der Größe 30 cm x 30 cm mit Glaslot als primärem Versiegelungsmaterial als Prototypen im Labor hergestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere für die Aufskalierung der Farbstoffsolarzellentechnologie auf große Flächen, eine siebgedruckte Glaslotversiegelung angebracht ist. Die thermische Stabilität der Glaslotversiegelung mit integrierter Serienschaltung wurde in einem thermischen Zyklentest von -40 °C bis 80 °C nachgewiesen. Systematische Tests von

Verfahren zur Herstellung solcher Module im Produktionsumfeld waren noch nicht durchgeführt.

Die Herstellbarkeit ausgewählter Druckpasten durch industrielle Verfahren der Siebdruckpastenherstellung und der Elektrolyte durch Mikroreaktortechnik war noch nicht gezeigt worden.

Entwicklung von Anwendungsszenarien

Anwendungsmöglichkeiten für Farbstoffsolarzellen waren in Ansätzen bekannt und erste Anforderungen an zukünftige FSZ-Produkte waren in einzelnen Gesprächen erhoben worden. Fokussierte Anwendungsfelder mit Nutzeranforderungen, Marktabschätzungen waren jedoch nicht systematisch herausgearbeitet.

Farbstoffsolarzellen als zukunftsfähige, umweltgerechte Technologie

Erste Abschätzungen zur Umweltwirkung von Farbstoffsolarzellen waren bekannt, detaillierte Analysen lagen jedoch noch nicht vor. Insbesondere bestanden noch keine Analysen zur energetischen Amortisationszeit, zu Recyclingmöglichkeiten und zur Toxizität des ausgewählten Elektrolyten.

2.2 Beschreibung des Vorhabens

Das Vorhaben ColorSol umfasste drei Hauptteile: Im Mittelpunkt stand die kooperative Technologieentwicklung von Farbstoffsolarzellen und deren Anwendungen in der Zusammenarbeit zentraler Unternehmen einer zukünftigen Wertschöpfungskette und wissenschaftlicher Einrichtungen (Modul 2). Die Technologie- und Marktentwicklung wurde durch eine Innovations- und Technikanalyse unterstützt, in der Technologie- und Produkt-Roadmaps erarbeitet, Lebenszyklusanalysen durchgeführt und die Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft herausgearbeitet werden (Modul 1). Das dritte Modul schließlich umfasste Maßnahmen zum Ergebnistransfer. In ihm wurden auch relevante Akteure beteiligt, um die Ergebnisse in die Solarbranche zu transferieren.

Im Konsortium arbeiteten einerseits anwendungsorientierte Forschungsinstitute mit und führten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Bereichen kooperative Technologieentwicklung, Nachhaltigkeitsbewertung, Entwicklung von Technologie- und Produkt-Roadmaps und der Erstellung von Anwendungsszenarien durch.

Beteiligte Forschungsinstitute waren:

- Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart: Forschungspartner für die Bereiche kooperative Technologieentwicklung, Anwendungsszenarien und Nachhaltigkeitsbewertungen,
- Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg:

Forschungspartner zur Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie,

- Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, Berlin:
Forschungspartner für Nachhaltigkeitsinnovationen, Technologie- und Produkt-Roadmapping, empirische Untersuchungen zu Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft, kooperative Technologieentwicklung und Nutzerintegration in den Innovationsprozess.

Entlang der Wertschöpfungskette für Farbstoffsolarzellen wurden gezielt Unternehmenspartner ausgewählt, um die wichtigsten Teile für Produktion und Anwendung der Technologie abzudecken. Dabei handelte es sich um folgende Produktionsunternehmen:

- Pröll KG, Weißenburg:
Produktion von Druckpasten für die Siebdrucktechnik
- BGT Bischoff Glastechnik AG, Bretten:
Herstellung von Flachglas, Siebdruck auf Glas
- Ionic Liquids Technologies GmbH & Co. KG (Io Li Tec), Freiburg:
Herstellung von Elektrolyten und Ionischen Flüssigkeiten (im Rahmen eines Unterauftrags).

Auf der Anwenderseite war folgendes Unternehmen beteiligt:

- Engco Advanced Technology GmbH (Engcotec), Stuttgart:
Projektierung und Montage von Solarzellen

Die potenzielle Wertschöpfungskette für Farbstoffsolarzellen mit einer Zuordnung der Praxispartner ist in Abbildung 1 dargestellt.

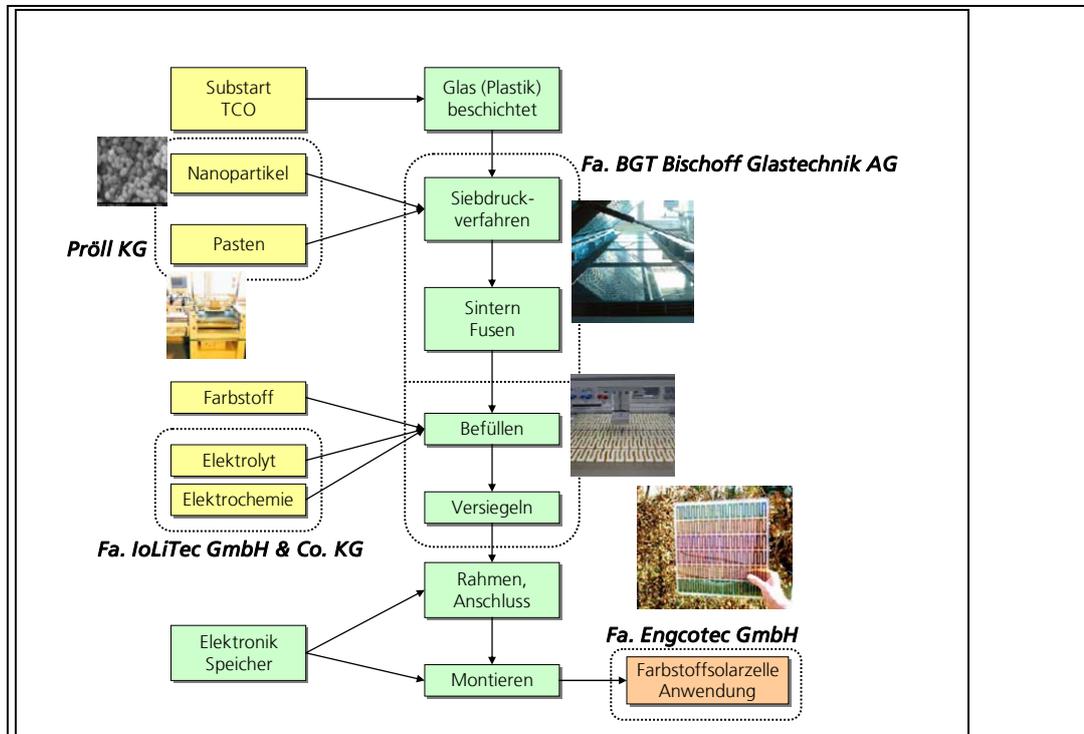


Abbildung 1: Wertschöpfungskette Farbstoffsolarzellen

Des Weiteren wurde der Bundesverband Deutscher Fertigung e. V. (BDF) eingebunden, um Nutzeranforderungen zu ermitteln und der Verbreitung von Projektergebnisse beizutragen (Teilnahme ohne Förderung)

Weiterhin wurden ausgewählte Arbeiten im Unterauftrag bearbeitet:

- Dr. Willy Bierter: Unterstützung bei der Durchführung von Workshops in AP 8.
- Fa. Campus Technologies GmbH, Freiburg: Toxizitätsanalyse des ausgewählten Farbstoffsolarzellen-Elektrolyts (in AP5).
- Dr. Piotr Putyra, Kraków: Entwicklung sowie Erstellung von Konstruktionen und Konstruktionszeichnungen für eine Farbstoffsolarzellen-Befüllmaschine in AutoCAD (3D) unter Auswahl und Einbindung von Standardkomponenten aus der Automatisierungstechnik sowie die Erstellung von Plänen für Spezialkomponenten (in AP6).
- Fa. Knapp Datentechnik, Sindelfingen: Entwicklung eines steuerungstechnischen Anlagenkonzepts für eine Farbstoffsolarzellen-Befüllmaschine einschließlich Umsetzung von Steuerungshardware und –software (in AP6).

Eine Zuordnung der Partner zu den Arbeitspaketen findet sich im folgenden Kapitel.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die beschriebenen wissenschaftlichen und umsetzungsorientierten Module des Vorhabens wurden im Zeitraum 1. April 2006 bis 31. Dezember 2008 bearbeitet.

Das Projekt ColorSol gliederte sich in drei Module: Im Mittelpunkt steht die kooperative Technologieentwicklung von Farbstoffsolarzellen und deren Anwendungen in der Zusammenarbeit zentraler Unternehmen einer zukünftigen Wertschöpfungskette und wissenschaftlicher Einrichtungen (Modul 2). Dabei wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- die Entwicklung der für das Herstellungsverfahren nötigen Druckpasten (AP 4),
- die Entwicklung und Optimierung eines Herstellungsverfahrens für Elektrolyte (AP 5),
- die Entwicklung eines Produktionsverfahrens für Farbstoffsolarzellen basierend auf Siebdrucktechnik und Verfahren der Glastechnik einschließlich der Entwicklung von Prototypen zur Demonstration der technischen Machbarkeit (AP6),

Nutzeranforderungen im Entwicklungsprozess wurden dabei ebenfalls berücksichtigt und flossen in die Entwicklung eines Prototypenpanels mit ein (AP 7).

Somit konnten Ergebnisse in Form neuer technischer Verfahren und Prototypen der weiterentwickelten Farbstoffssolarzelle, die in Anwendungs- und Feldtests genutzt und überprüft wurden, erarbeitet werden.

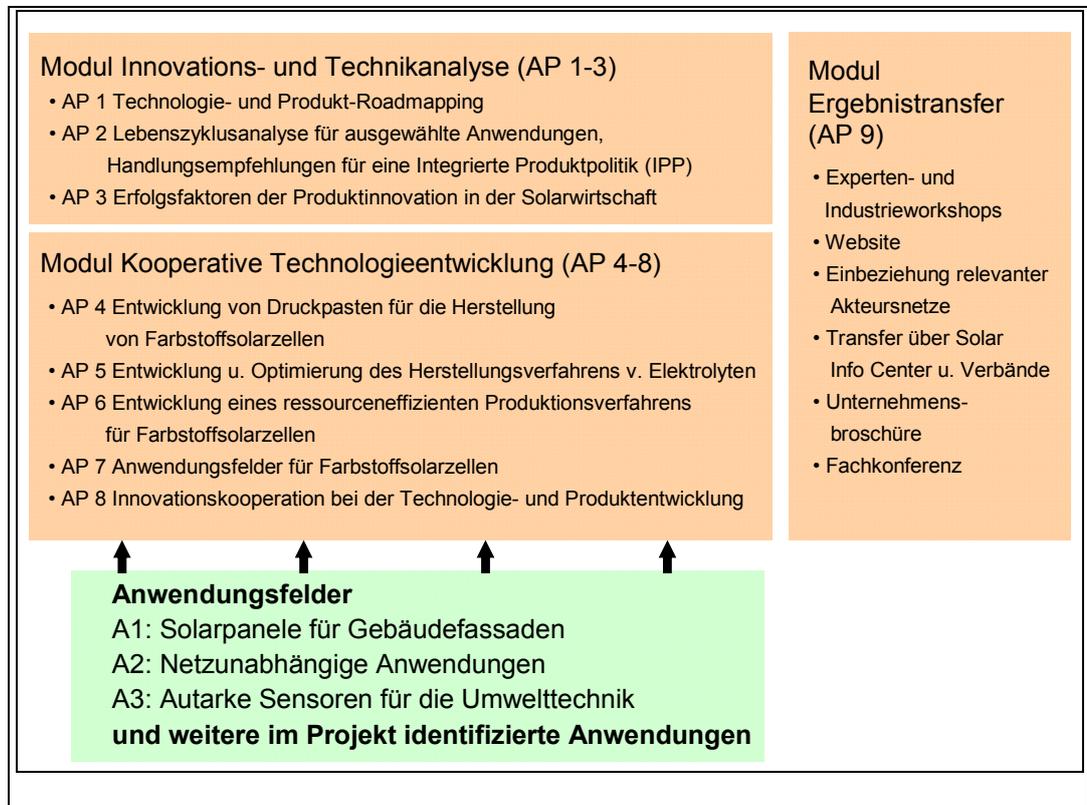


Abbildung 2: Aufbau des Projekts ColorSol (Module und Arbeitspakete)

In den jeweiligen Unternehmensprojekten wurden, neben der technischen Entwicklungen, in Arbeitspakets AP 7 mit Hilfe der Lead-User-Methodik Nutzeranforderungen ermittelt und Anforderungen möglicher Kunden aufgenommen, strukturiert und bewertet. Anwendungsideen wurden ermittelt und für ausgewählte Ideen Anwendungskonzepte ausgearbeitet. Die Erkenntnisse hieraus flossen in die technischen Entwicklungen (AP 4 – AP 6) mit ein.

Um eine effiziente Zusammenarbeit zwischen den beteiligten wissenschaftlichen Partnern und den Unternehmen zu gewährleisten wurden die Arbeiten der Partner eng abgestimmt (AP 8). Weiterhin wurden in AP 8 (Innovationskooperation bei der Technologie- und Produktentwicklung) ein Innovationsworkshop und ein Strategieworkshop durchgeführt.

Die Technologie- und Marktentwicklung wurde durch eine Innovations- und Technikanalyse unterstützt, in der Technologie- und Produkt-Roadmaps erarbeitet, Lebenszyklusanalysen durchgeführt und die Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft herausgearbeitet wurden (Modul 1). Modul 3 schließlich umfasste Maßnahmen zum Ergebnistransfer.

Die Zusammenarbeit der Partner wird in folgender Abbildung in einer Kooperationsmatrix verdeutlicht.

		FhG IAO	Border- step	FhG ISE	Eng- cotec	Pröll	Io Li Tec	BGT
AP1	Technologie- und Produkt-Roadmapping	M	<u>L</u>	M				
AP2	Lebenszyklusanalysen, Handlungsempfehlungen IPP	<u>L</u>	M	M				
AP3	Erfolgsfaktoren für Produktinnovationen in der Solarwirtschaft	M	<u>L</u>	M				
AP4	Entwicklung von Druckpasten für Farbstoffsolarzellen	M		M		<u>L</u>		
AP5	Entwicklung und Optimierung Herstellungsverfahren Elektrolyte	M		M			<u>L</u>	
AP6	Entwicklung Produktionsverfahren	M		<u>L</u>				M
AP7	Entwicklung Anwendungsfelder	M	M	M	<u>L</u>			
AP8	Innovationskooperationen Techn.- u. Produktentwicklung	<u>L</u>	M					
AP9	Ergebnistransfer	<u>L</u>	M	M				

M: Mitarbeit
L: Leitung des Arbeitspakets

Abbildung 3: Kooperationsmatrix

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der wissenschaftlich-technische Stand für das Forschungsprojekt ColorSol zu Beginn des Projekts wird im Folgenden beschrieben.

4.1 Farbstoffsolarzellen

Einführung

Die Farbstoffsolarzellentechnologie entwickelte sich rasant seit Wirkungsgrade über 10 % im Labormaßstab erreicht wurden (O'Regan 1991) (mittlerweile wurden 11,2 % durch die Fa. Sharp erreicht, vgl. Chiba et al. 2006). Aufgrund potentiell günstiger Produktionskosten und des attraktiven farblichen Designs wird weltweit beachtlicher Aufwand betrieben, um eine Markteinführung dieser neuen Solarzellenart voranzutreiben. Große Fortschritte im Gebiet der Langzeitstabilität von Farbstoffsolarzellen wurden insbesondere durch den Einsatz von niederviskosen Elektrolyten basierend auf ionischen Flüssigkeiten erzielt (Hinsch 2001; Toyoda 2004; Wang 2003). Kürzlich veröffentlichten Wang et al. Alterungsdaten einer 8 % effizienten Farbstoffsolarzelle mit einem niederviskosen Elektrolyten, die eine sehr gute Stabilität bei 80 °C für 1000 Stunden belegten (Wang 2005).

Die Aufskalierung der Farbstoffzellen-Technologie auf größere Flächen erlebte während der letzten Jahre ebenfalls deutliche Fortschritte. 10x10 cm² große Farbstoffsolarzellen mit paralleler Verschaltung wurden von Spath et al. demonstriert, indem stromsammelnde Silberlinien mit einem heißschmelzenden Polymer vor dem Elektrolyten geschützt wurden (Spath 2003). Galvanisch aufgebraute Nickellinien, die durch eine Fluor dotierte SnO₂ Schicht gegen den Elektrolyten geschützt werden, wurden ebenfalls erfolgreich auf 10x10 cm² Zellen getestet (Okada 2004).

Die zurzeit am weitesten verbreitete Farbstoffzellen-Technologie ist die des parallel verschalteten Moduls, in dem stromsammelnde Silberlinien mittels eines heißschmelzenden Polymers gegen den Elektrolyten geschützt werden. Großflächige Farbstoffsolarmodule wurden so entwickelt und für ein halbes Jahr unter Freilandbedingungen getestet. Wie von Toyoda et al. veröffentlicht, lieferten diese Module 10-20 % mehr Leistung, als aufgrund ihrer Nennleistung erwartet werden konnte (Toyoda 2004). Ähnliche Farbstoffsolarzellen-Module der Größe 40x60 cm² mit Wirkungsgraden von 6 % wurden von Dai et al. entwickelt (Dai 2005).

Die größte Hürde für die Farbstoffzellen-Technologie auf ihrem Weg vom Labormaßstab zu großflächigen Anwendungen ist die Langzeitstabilität. Dabei ist die Stabilität von großflächigen Farbstoffsolarzellen-Anwendungen oft eine Frage der hermetischen Versiegelung. Im Fraunhofer ISE wurden zwei verschiedene Designs für Farbstoffsolarzellen-Module mit integrierter Serienschaltung entwickelt. Als hermetische Versiegelung und als Schutz für die elektrisch leitenden Silberlinien vor dem Elektrolyten wird am Fraunhofer ISE eine Methode eingesetzt, die auf Glasloten basiert und der Versieglungsmethode von Plasma Bildschirmen ähnelt. Glaslot hat den Vorteil, dass es kostengünstig mittels Siebdruck aufgebracht werden kann und sehr stabile thermische, chemische und mechanische Eigenschaften hat. Es hat den Nachteil einer hohen Verarbeitungstemperatur. Deshalb kann der Farbstoff bei dieser Versieglungstechnologie erst nach dem Verschmelzen des Glases in das Modul injiziert werden.

Herstellungsprozess

Das Flussdiagramm in Abbildung 4 veranschaulicht die Herstellungsschritte des Moduls am Fraunhofer ISE zu Beginn des Projekts ColorSol. Die Vorbehandlung des Glassubstrats beinhaltet die Laserstrukturierung der TCO-Schicht, das Bohren der Befüllöffnungen und das Waschen des Glases. Die TiO₂-, ZrO₂-, Platin-, Silber- und Glaslotschichten werden auf die jeweiligen Glassubstrate siebgedruckt. Nach jedem Siebdruckschritt wird die Schicht in einem Konvektionsofen bei 150 °C für etwa 10 min getrocknet. Erste Versuche zum Siebdruck auf 60x100 cm² Prototypen wurden bei der Firma Bischoff-Glastechnik durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese Platten mittels Fusen versiegelt wurden.

Dann werden alle Schichten bei 580 °C für 10 min gesintert. Vorder- und Rückelektrode werden aufeinander ausgerichtet und bei Temperaturen über 600 °C unter Standardatmosphäre miteinander verschmolzen (Fusing).

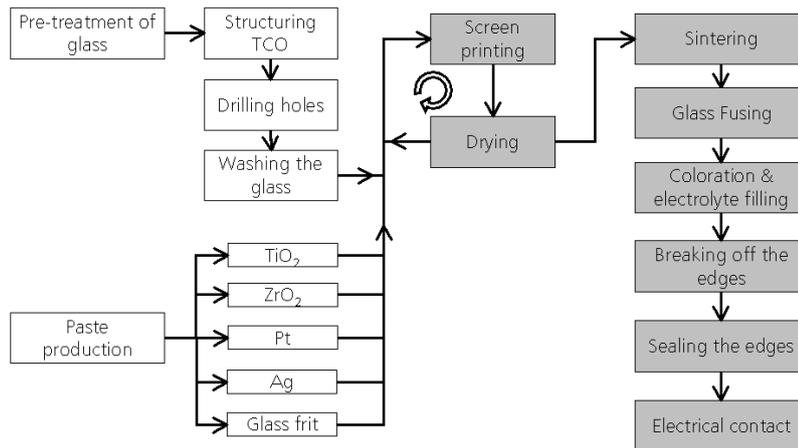


Abbildung 4: Herstellungsprozess eines Farbstoffsolarzellen-Moduls mit Glaslotversiegelung.

Eine Einfärbe- und Befüllstation für 30x30 cm² Modulen wurde entwickelt, die eine automatische Positionierung des Moduls und eine Temperaturregelung gestattet. Die Farbstoff- bzw. Elektrolytlösung wird mit hohem Druck über pneumatische Kartuschen ins Modul injiziert. Dieser Prozess dauert etwa 2 Stunden, kann jedoch als modularer Batchprozess leicht parallelisiert werden. Werden reine ionische Flüssigkeiten als Elektrolyte verwendet (ohne Lösungsmittel), wird das Modul auf 70 °C aufgeheizt, um die Viskosität der Lösung zu verringern. Auf diese Weise konnte die Befüllung von 30x30 cm² Modulen mit hochviskosen ionischen Flüssigkeiten gezeigt werden.

Die Befülllöcher wurden vor Projektbeginn mit einer heißschmelzenden Polymerfolie (Surlyn, Dupont) und einem dünnen Glasplättchen versiegelt. Idealerweise wurden auch hier die Befüllöffnungen mit Glaslot versiegelt. Um ein Befüllloch mit Glaslot zu versiegeln, wird dazu zunächst ein kleiner keramischer Verschluss während des Fusing-Prozesses in das Loch geschmolzen. Dieser Verschluss ist wiederum mit einem kleinen Loch für die Einfärbung und Befüllung versehen. Das kleine Loch wird dann mit lokal aufgeschmolzenem Glaslot versiegelt. Die Keramik fungiert dabei als thermischer Isolator.

Für Langzeittests werden Farbstoffsolarzellen auf so genannten Masterplates verwendet (Hinsch 2001). Ein Masterplate besteht aus 5 identischen Zellen mit einer Fläche von jeweils 5x0,5 cm². Die Masterplates sind vollständig mit Glaslot und keramischem Lochverschluss versiegelt.

Es wurden am Fraunhofer ISE beschleunigte Alterungstests an Farbstoffsolarzellen gemäß Teilen der IEC 61646 Norm für Dünnschichtsolarmodule durchgeführt. Dazu wurden Farbstoffsolarzellen der Fläche 2,5 cm² (Masterplates) vollständig mit Glaslot versiegelt (keramischer Lochverschluss). Als Elektrolyte wurden unverdünnte ionische Flüssigkeiten basierend auf Propylmethylimidazoliumiodid (PMII) verwendet. Alle durchgeführten Alterungstests zeigen meistens eine schnelle anfängliche Veränderung der Zelleffizienz (Anstieg oder Degradation) während der ersten 200 Stunden thermischer Alterung bei 85 °C im Dunkeln. Während der darauf folgenden 1000 Stunden unter den gleichen Bedingungen, wird eine sehr viel langsamere Degradation beobachtet. Bei anschließender Beleuchtung mit sichtbarem Licht entsprechend der Intensität von einer Sonne, findet ein Erholungseffekt für etwa 200 Stunden statt. Danach folgt für mehr als 1000 Stunden anhaltender Beleuchtung wiederum eine sehr langsame Degradation.

Zusammenfassung des Standes der Wissenschaft zu Beginn des Projekts

Aufgrund der hohen Anforderungen an eine dauerhaft stabile Versiegelung für großflächige Farbstoffsolarmodule wird Glaslot für ein geeignetes Material gehalten. Glaslot ist thermisch, mechanisch sowie chemisch sehr stabil und kann kostengünstig mittels Siebdruck aufgebracht werden. Farbstoffsolarzellen-Module der Fläche 30x30 cm², mit Glaslot als primärem Versiegelungsmaterial wurden hergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere für die Aufskalierung der Farbstoffsolarzellen-Technologie auf große Flächen, eine siebgedruckte Glaslotversiegelung angebracht ist. Die thermische Stabilität der Glaslotversiegelung mit integrierter Serienschaltung wurde in einem thermischen Zyklentest von -40 °C bis 80 °C nachgewiesen.

In aufeinander folgenden beschleunigten Alterungstests unter 85 °C im Dunkeln (1400 Stunden) und kontinuierlicher Beleuchtung mit sichtbarem Licht (1 Sonne, 1700 Stunden) zeigte eine 2,5 cm² Farbstoffsolarzelle mit einem Elektrolyten basierend auf Propylmethylimidazoliumiodid eine Gesamtabnahme der Effizienz von weniger als 5 %.

4.2 Anwendungsfelder

Integration von Solarzellen in architektonische Anwendungen

In der Vergangenheit wurden Solarzellen meist in Form standardisierter Panele auf Häusern für die reine Energieerzeugung genutzt. Dementsprechend gering waren die Gestaltungsmöglichkeiten, diese musste sich im Wesentlichen an der vorgegebenen Panelgröße und der blauen bzw. schwarzen Farbe der Siliziumpanele orientieren (für eine Übersicht siehe Gabler et al. 2001).

Mittlerweile werden in der Architektur Solarzellen für die folgenden weiteren Anwendungen genutzt:

- Fassaden:
Solarmodule werden als Fassadenverkleidung eingesetzt und übernehmen damit die Funktionen der bisher eingesetzten Materialien Glas, Naturstein, Keramik, etc. Das Solarmodul wird in diesem Fall wie eine Fassadenplatte als äußerer Witterungsschutz auf die Fassade aufgebracht und hinterlüftet. In seinen thermischen Eigenschaften ist es vergleichbar mit einer Glasplatte. Für die Integration von Solarzellen in die Gebäudehülle sind verschiedene standardisierte Systeme auf dem Markt erhältlich, die speziell entwickelt bzw. an klassische Fassadenkonstruktionen weitestgehend angepasst sind, um die Installation zu vereinfachen sowie die Kosten für die Installation zu reduzieren.
- Sonnenschutz:
Solare Stromgewinnung und der Licht- bzw. Sonnenschutz bilden zwei sich bedingende Effekte. Die Sonnenstrahlung, welche von Solarzellen auffangen wird, erreicht den dahinter liegenden Raum nicht. Eine Verschattung bei gleichzeitiger Energiegewinnung kann daher mit den gleichen Mitteln erreicht werden, in dem Solarzellen für den Licht- bzw. Sonnenschutz genutzt werden.
- In dieser Funktion finden Solarzellen zum einen Anwendung in Lamellen, Fensterläden, Vordächer, es gibt jedoch auch viel versprechende zukünftige Anwendungen z.B. in Form von Isolierverglasungen für Glasfassaden mit Photovoltaik, semitransparenten Solarzellen (wie z.B. die Farbstoffsolarzelle), welche das Tageslicht diffus und gleichmäßig in die Innenräume bringen oder reflektieren.

Netzunabhängige Anwendungen für Photovoltaik-Module

Netzgebundene Photovoltaikanlagen haben einen Anteil von 56% an der gesamten photovoltaischen Stromerzeugung. 10% entfallen auf Konsumerprodukte wie Uhren, Taschenrechner, 34% entfallen dagegen auf netzunabhängige Anwendungen. Die netzunabhängige Anwendung der Solarzellen teilt sich wiederum auf in Anwendungen für ländliche Gebiete (19%), Kommunikationssysteme (11%) und Haushalte (4%) (Frost & Sullivan 2004).

Aufgrund der noch vergleichsweise hohen Kosten für die Erzeugung des Solarstroms, zählen dezentrale netzunabhängige Anwendungen bis heute zu dem wichtigsten Markt für Solarzellen. Sie sind dann im Vorteil, wenn der Netzanschluss zu teuer ist oder ein Stromnetz nicht verfügbar ist (z.B. Telekommunikation im Gebirge). Konkurrenzfähig ist die Photovoltaik zudem für die Stromerzeugung in abgelegenen Eigenheimen und Siedlungen die nicht das Stromnetz angeschlossen sind. Dort werden Solarzellen auch hybride System in Kombination mit Dieselaggregaten, Wind- oder Wasserkraftwerken genutzt. Weitere Anwendungen existieren für Ferienhäuser, Boote und Wohnmobile sowie für die Stromversorgung von Verkehrsleuchtzeichen, Displaysysteme

(Werbetafeln, Geschwindigkeitsanzeigen, etc.) oder Straßenlaternen. Im Bereich der Kommunikation werden durch Solarstrom Verstärker, Relaisstationen oder Notfalltelefone betrieben. Auch in Überwachungssystemen, z.B. für die Wetterbeobachtung, Wassertemperatur oder Pipelines, kommen Systeme mit einer Leistung von weniger als 200 W zum Einsatz (Frost & Sullivan 2001 und Kleinauf et al. 2001).

Autarke Sensoren für die Umwelttechnik

Neben Thermischen Sensoren, Masse-Sensoren und Optischen Sensoren werden weiterentwickelte elektrochemischen Sensoren, deren prominentester Vertreter die Lambda-Sonde in Katalysatoren von PKW ist, zukünftig eine besondere Bedeutung erlangen, da diese sowohl wichtige Größen für die Mess- und Regeltechnik aufnehmen können als auch für anspruchsvolle analytische Zwecke eingesetzt werden können.

Die Messprinzipien elektrochemischer Sensoren sind außerordentlich vielfältig und können daher im Rahmen dieses Antrages nur schematisch dargestellt werden. Prinzipiell tritt die jeweilige Messgröße mit dem Messelektrolyten in Wechselwirkung, wodurch sich ein elektrisch auslesbares Signal ergibt, z.B. die Leitfähigkeit (Konduktometrie). Hauptmärkte für Sensoren in der Umwelttechnik sind meteorologische Sensoren (z. B. zur frühzeitigen Erkennung von Unwettern, Windmessungen), Sensoren zur Kontrolle und Test von Autoabgasen, und Sensoren zur Analyse von Luftverschmutzungen (z. B. flüchtige organische Kohlenstoffe, Bodenozone, CO oder CO₂) (Frost&Sullivan 2003b).

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Diskussion des aktuellen Entwicklungsstands der Farbstoffsolarzellentechnologie und der sich abzeichnenden technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Trends in deren Umfeld, zum Austausch von technischen Erfahrungen und zur Diskussion von Nutzeranforderungen wurde ein enger Austausch mit folgenden Organisationen, Netzwerken und Projekten gepflegt:

- BMBF-Netzwerk „Entwicklung von Systemkomponenten für langzeitstabile Farbstoffsolarzellen mit hohem Wirkungsgrad“,
- EU-Netzwerk orgaPV-Net,
- Prof. Grätzel, EPFL Lausanne,
- Energy Center of the Netherlands ECN,
- Fa. MP+L-Produktions GmbH, Neufinsing,
- Fa. Bühler AG, Uzwil/Schweiz,

- Fa. Systaic, Berlin,
- Fa. Sunplugged, Mieming (Österreich),
- Architekturbüro Dr. Hagemann,
- Prof. Dr. Ing. Hullmann, hwp hullmann, willkomm & partner, Hamburg,
- Dr. Ing. Susanne Rexroth, Institut für Baukonstruktion, TU Dresden.

Weiterhin fand ein Austausch bzgl. Methoden des Technologie- und Innovationsmanagement mit folgenden Projekten statt:

- Präsidialprojekt „Technologieadaption“ der Fraunhofer-Gesellschaft,
- BMBF-Forschungsvorhaben „Innovation Communities (InnoCo) – Aufbau und Entwicklung von Promotorennetzwerken als Erfolgsfaktor radikaler Innovationen.

Teil II: Darstellung der Ergebnisse, des Nutzen und des Fortschritts sowie entsprechende Verwertung

In den folgenden Kapitel werden die zentralen Ergebnisse des Forschungsprojektes ColorSol dargestellt.

1 Modul Innovations- und Technikanalyse

1.1 Arbeitspaket 1: Technologie- und Produkt-Roadmapping

Das Arbeitspaket Technologie- und Produkt-Roadmapping hatte zum Ziel, einen Orientierungs- und Planungsrahmen für den Projektverbund zu schaffen, der als Grundlage für die Entwicklung der Farbstoffsolarzellen und deren Anwendungsfeldern dienen sollte. AP 1 unterteilte sich in folgende Teilpakete, die unter Leitung des Borderstep-Instituts in Kooperation mit den Projektpartnern bearbeitet wurden:

AP 1.1 Erfassung relevanter Einflussbereiche und Trends

In AP 1.1 wurden zunächst die für die Weiterentwicklung von Farbstoffsolarzellen relevanten politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie das Technologie- und Marktumfeld analysiert. Dabei wurden auch die Rahmenbedingungen in den drei geplanten Anwendungsfeldern Solarpaneele für Gebäudefassaden, netzunabhängige Anwendungen für Photovoltaik-Module und autarke Sensoren für die Umwelttechnik einer detaillierten Analyse unterzogen.

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Farbstoffsolarzelle (Transparenz, Farbigkeit, etc.), der Förderung durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) sowie der erwarteten Produktionskapazitäten (siehe Abbildung 5) und Anwendungsfelder im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik, erfolgte eine Konzentration auf Fassadenanwendungen und gebäudeintegrierte Photovoltaik.

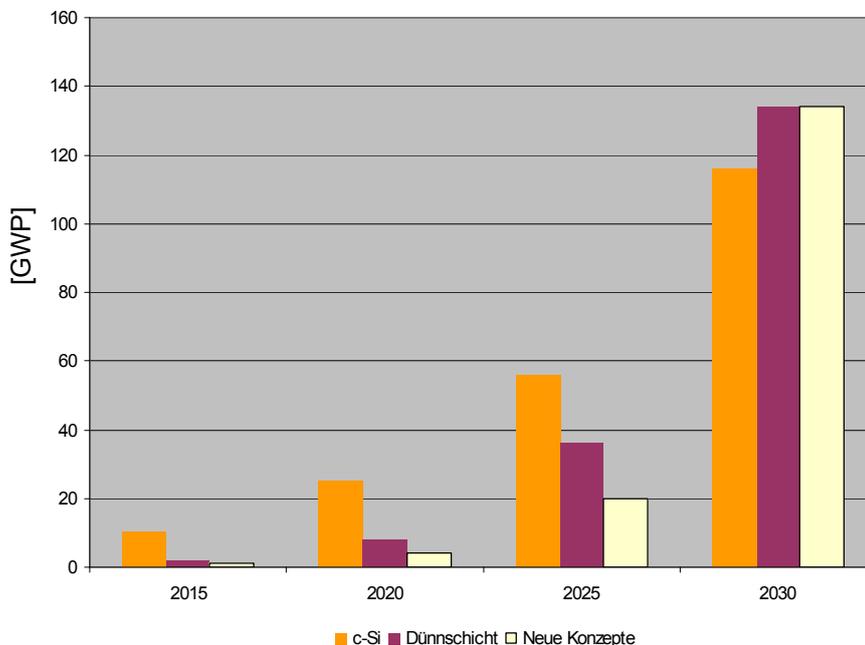


Abbildung 5: Prognose zukünftiger Produktionskapazitäten unterschiedlicher PV- Technologien (eigene Darstellung nach Daten von Hoffmann 2004a: 14)

Für die Bewertung des Anwendungsfeldes der gebäudeintegrierten Photovoltaik sind neben den physikalischen Leistungsdaten der Farbstoffsolarzelle vor allem auch Trends, wie z.B. die Preis- und Marktentwicklung im Bereich der Gebäudefassaden ausschlaggebend. Diese wurde daher zusätzlich erfasst.

AP 1.2 Ausarbeitung von Szenarien für das Einflussumfeld der Photovoltaik

Bei der Analyse der relevanten Einflussbereiche und Trends wurde zunächst auf existierende Berichte und Marktstudien zugegriffen. Die darin enthaltenen Prognosen wurden dann durch Experteninterviews sowie eigene Abschätzungen insbesondere im Marktsegment der gebäudeintegrierten Photovoltaik ergänzt und zu einem Bericht zusammengefasst (siehe unten). Als Zeitraum für die langfristige Entwicklung der Rahmenbedingungen wurde das Jahr 2020 gewählt und die Abschätzungen zu einem Rahmenszenario zusammengefasst, das als Rahmen für die weitere Ausrichtung der Technologieentwicklung diente.

AP 1.3 Ausarbeitung einer Technologie-Roadmap für Farbstoffsolarzellen

Für die technische Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzelle wurden, aufbauend auf den in AP 1.1 und 1.2 erfassten und ausgewerteten Rahmenbedingungen zunächst drei Typen von Szenarien unterscheiden, die dazu dienen sollten, die weitere Planung der Entwicklungsaufgaben für die Farbstoffsolarzellen mit Prioritäten zu versehen. Dabei wurden drei Zeitstufen unterschieden:

- Kurzfristig (Frühjahr 2007): Szenario für funktionsfähiges Prototypen-Panel (Prototypenszenario)
- Mittelfristig (Herbst/Winter 2007): Szenarien für Demonstrationsanlagen (Demonstrationsszenarien)
- Langfristig: Szenarien für serien- und marktreife Anwendungen (Marktszenarien)

Für die letztgenannten Anwendungsszenarien wurden Einflussbereiche, Anforderungen für drei mögliche Nutzungen von Farbstoffsolarzellen in der gebäudeintegrierten Photovoltaik (Dachliegefenster, Fassadenelement, Photovoltaikverglasung) definiert. Neben den technischen Anforderungen wurden parallel wirtschaftliche, rechtliche und gestalterische Anforderungen definiert und Szenarien für die kurz-, mittel- und langfristige Gestaltung von Anwendungen und Produkten beschrieben. Diese wurden in einem Kriterienraster zusammengefasst (siehe Tabelle 1) nachdem die einzelnen Anwendungen bewertet wurden.

Tabelle 1: Kriterienraster für die Bewertung von Anwendungsszenarien

Kriterium	Konkrete Anforderung	Relevanz für Anwendungsszenarios
Technische Kriterien		
Modulwirkungsgrad	X %	
Modulnennleistung	X Wp	
Langzeitstabilität	Minimum: X Jahre	
Alterungsverhalten		
Weitere photovolt. und elektr. Parameter		
Technische Zulassung	Zertifiziert nach	
Usw.		
Wirtschaftliche Kriterien		
Preis pro kW _p	X €	
Preis je m ² im Vergleich zu anderen PV-Technologien und Fassadenbaustoffen	Preis FSZ < Preis Konkurrenz-PV/Material	
Amortisationszeit bei def. Förderbedingungen	X Jahre	
Anlagenrentabilität	X %	
Usw.		
Rechtliche Kriterien		
Nutzungsbezogene Patentrechte, Lizenzen	Gesichert	
Baugesetzgebung und Baugenehmigung, z.B. für Überkopfverglasung	Erfüllt	
Elektrotechnische Normen	Erfüllt	
Unfallschutz und Sicherheit	Erfüllt	
Gewährleistung	Minimum: X Jahre	
Usw.		
Systemanforderungen		
Integrierbarkeit in Energie- und PV Gesamtkonzepte	Gewährleistet	
Multifunktionalität	Gewährleistet	
Montagefreundlichkeit	Gewährleistet	
Wartungsfreundlichkeit	Gewährleistet	
Austauschbarkeit	Gewährleistet	
Usw.		
Gestalterische Kriterien		
Farbigkeit	Art verfügbarer Farben	

Farbenvielfalt	Anzahl verfügbarer Farben: X	
Verfügbarkeit genauer Farbtöne	Erfüllt	
Farblich homogene Flächen	Erfüllt	
Farbechtheit	Minimum: X Jahre	
Variable Struktureffekte: Mäander, Streifen	Erfüllt	
Verfügbarkeit semitransparenter Module	Gegeben	
Verfügbarkeit kundenspez. Transparenzgrade	Gegeben	
Größe Modul bzw. Modulverbund	Minimum 90 x 90 cm	
Variable Skalierbarkeit	Gegeben	
2D-Formgebung, z.B. Dreiecke	Gegeben	
3D-Formgebung, z.B. gebogene Module	Gegeben	
Usw.		
Umwelt- und Gesundheitskriterien		
Energetische Amortisationszeit	XY Jahre	
Relative energetische Amortisationszeit	FSZ < als z.B. CIGSSe-Technol.	
Toxisch unbedenkliche Inhaltsstoffe	Gegeben	
Recyclingfähigkeit: z.B. Verwertungsquote	Erfüllt	
Usw.		
Zeitliche Kriterien		
Voraussetzung für weitere Entwicklungsarbeiten („Bottle Neck“)		
Entwicklungsstand in konkurrierenden Projekten, z.B. geplante Markteinführung	In z.B. 2009	
Verfügbarkeit funktionsfähiger Module	Bis z.B. 2008	
Marktverfügbarkeit großer Modulzahlen	X Module z.B. in 2010	

Nach einer Bewertung wurden die Anwendungsszenarien mit den oben genannten Prototypen und Demonstrationsszenarien mit ihren jeweiligen technischen Entwicklungsbedarfen zu einer Roadmap zusammengefasst.

AP 1.4 Produkt-Roadmaps für ausgewählte Anwendungen der Farbstoff-solarzelle

Für eine weitere Konkretisierung der in AP 1.3 erarbeiteten Technologie-Roadmap für Farbstoffsolarzellenanwendungen wurde insbesondere der Anwendungsbereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik weiter vertieft und ein Marktszenario (siehe unten) sowie eine Produkt-Roadmap mit dem Zeithorizont 2010 erstellt, die konkrete Entwicklungsvorgaben für die Nutzung von Farbstoffsolarzellen in Gebäudefassaden enthält. Ergänzend zur Produkt-Roadmap wurde das Marktpotential für Fassadenanwendungen von Farbstoffsolarzellen auf der Grundlage der AP 1.1 erfassten Trends bestimmt und in einzelne nationale Teilmärkte differenziert.

Marktszenario 2010 für eine fiktive Firma FSZ Solutions GmbH

Im Jahr 2010 bringt die FSZ Solutions GmbH als weltweit erster Anbieter multifunktionale Fassadenelemente mit integrierten Farbstoffsolarzellen an den Markt. Diese hochwertigen Fassadenelemente werden kundenindividuell im Manufaktur-Betrieb gefertigt und können daher in unterschiedlichen Größen geliefert werden. Die Module sind zunächst ausschließlich für Fassaden konzipiert (keine Überkopfverglasung) und können sowohl in Kalt- als auch in Warmfassaden eingesetzt werden. Die Elemente werden mit marktgängigen Montagesystemen geliefert. Muster und Transparenzgrade der Module können vom Kunden individuell festgelegt werden (vom X – Y %). Das verfügbare Farbspektrum der Farbstoffsolarzellen ist in den ersten beiden Jahren nach Markteintritt auf eine Farbe begrenzt ist, wobei durch zusätzliches Bedrucken der Glasaußenflächen kundenindividuelle Farbeffekte erzielt werden können. Die Preis beläuft sich je nach Ausführung auf 500 bis 2.000 €/qm. Im ersten Jahr nach Markteintritt verkauft die FSZ Solutions GmbH multifunktionale Fassadenelemente für 10 Bauvorhaben in Deutschland, Italien, Frankreich und Spanien. Die produzierte und verkaufte Fläche beträgt dabei 5.000 m². Die verkaufte Modulfläche steigert sich in den drei Folgejahren auf 10.000 m², 20.000 bzw. 30.000 m². Die FSZ Solutions GmbH wurde im Jahr 2008 gegründet und hat seither die FSZ-Fassadenelemente zusammen mit Forschungspartnern und Partner in der Wertschöpfungskette bis zur Marktreife entwickelt, für die Zertifizierung und Zulassung gesorgt und hat seither die Vermarktung und den Vertrieb übernommen. Bei der Herstellung wird mit den Firmen Pröll (Pasten) IoLiTec (Electrolyte) und Bischoff Glastechnik (Herstellung im Manufakturbetrieb) zusammengearbeitet.

Zur Bestimmung der relevanten Kostenstrukturen und Preise einer zukünftigen Herstellung und Kommerzialisierung, wurden durch das Fraunhofer IAO zunächst die Fertigungskosten abgeschätzt. Darauf aufbauend wurde durch das Borderstep Institut eine Zielkostenrechnung erstellt, die Stückkosten und Preise potenzieller Produkte im Bereich Gebäudefassaden erfasst und diese mit konkurrierenden Photovoltaiktechniken (insbesondere Dünnschichttechniken) und Fassadenmaterialien setzt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse von AP 1 stellten wichtige Voraussetzungen für die folgenden Module und Arbeitspakete insbesondere auch die Arbeiten in AP 7 (Anwendungsfelder für Farbstoffsolarzellen) dar. Die erarbeiteten Technologie- und Produkt-Roadmaps lieferten, unter Anderem, die Grundlage für die Entwicklung von Anwendungsideen und Anwendungskonzepten und wurden nach der Bewertung durch trendführende Nutzer und Anwender in AP 7.3 entsprechend angepasst.

Aus AP 1.1 und AP 1.2 („Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle – Perspektive 2020“) lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Der Photovoltaikmarkt entwickelt sich weltweit mit großen Zuwachsraten. In dem sich ausdifferenzierenden Markt konkurriert mittlerweile eine Vielzahl von Technologien miteinander, die auf jeweils spezifische Anwendungsfelder wie z.B. den Einsatz in Kraftwerken, Gebäuden oder auch in der netzunabhängigen Stromversorgung angepasst sind. Neben dem Wirkungsgrad spielen dabei auch die Kosten und die Leistung unter realen Einsatzbedingungen eine wichtige Rolle.

Die Marktpotenziale der Photovoltaik und insbesondere der gebäudeintegrierten Photovoltaik verdeutlichen den hohen Bedarf an neuen, konkurrenzfähigen PV-Technologien, die hinsichtlich der Kosten, und der gestalterischen Optionen (Farbe, Transparenz, etc.) in bestehende Bauwerke und Stile integriert werden können. Hierfür bieten neue Dünnschichttechnologien und insbesondere Farbstoffssolarzellen ein großes Potenzial.

Hochwertige Farbstoffsolarzellen für die Anwendung in der Fassade, wie sie im Forschungsvorhaben ColorSol angestrebt werden, zielen damit auf das Marktsegment gebäudeintegrierter, langlebiger Fassadenanwendungen ab. Kurzlebige, folienbasierte Alternativen stellen daher zunächst keine unmittelbare Konkurrenz dar.

Auch bei konservativer Abschätzung des Marktpotenzials könnte mit der erfolgreichen Entwicklung einer Farbstoffsolarzellenanwendung für die Gebäudeintegration ein Marktsegment erschlossen werden, das einen Einstieg in eine Kleinserienproduktion rechtfertigen würde. Dies zeigen die eigenen Abschätzungen.

Für die weitere Entwicklung der Farbstoffsolarzellen ist zum einen die Beobachtung und Bewertung der konkurrierenden Dünnschichttechnologien (insbesondere a-Si und CIS-Technologien) sowie der polymerbasierten organischen PV von großer Bedeutung. Insbesondere die bereits am Markt erhältlichen Dünnschichtmodule stellen das derzeit stärkste und am weitesten entwickelte Konkurrenzprodukt dar, von dem sich die Farbstoffsolarzelle technisch, gestalterisch und preislich differenzieren muss.

Zum anderen liefern die Anforderungen und Entwicklungen aus dem Fassadenbau wichtige Hinweise für die Entwicklung von Farbstoffsolarzellen und deren Integration in Gebäude. Für die Bewertung von Farbstoffsolarzellen ist der Vergleich mit Fassadenmaterialien entscheidend, da in diesem Segment die Zahlungsbereitschaft pro Quadratmeter höher ist, als im Bereich klassischer Photovoltaik. Damit verbunden sind jedoch auch erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Haltbarkeit, der Sicherheit und des Designs der eingesetzten Materialien.

Die Ergebnisse zu AP 1.3: „Ausarbeitung einer Technologie-Roadmap für Farbstoffsolarzellen“ können wie folgt zusammengefasst werden:

Aus den Arbeiten des Forschungsprojektes ColorSol und dem Ziel einer Pilotproduktion von FSZ-Modulen lassen sich weitere F+E Bedarfe ableiten, die in einem in kurz-, mittel- und langfristige Ziele unterteilt werden können.

Kurz- bis mittelfristige F+E Ziele (Zeithorizont bis 2011):

1. Weitere Optimierung von Chemie und Modultechnik gemäß den spezifischen Anforderungen, d.h. Verbesserung von Pasten, Druck-, Sinter- und Fusingprozessen, ionischen Flüssigkeiten, Farbstoffen, etc.
2. Spezifische Abstimmung von ionischen Flüssigkeiten und Farbstoffen für die glasbasierte FSZ- Anwendung in der GIPV
3. Weiterentwicklung der Produktionstechnik gemäß der formulierten spezifischen Anforderungen
4. Aufbau einer Innovation Community zur Entwicklung von Anwendungsfeldern und Märkten von FSZ

Langfristige F+E-Ziele (Zeithorizont bis 2015):

1. Aufbau einer Pilotproduktion, z.B. für Fassadenanwendungen
2. Zertifizierung eines FSZ-Systems, z.B. für Fassadenanwendungen.

AP 1.4: „Produkt-Roadmap und Marktszenario 2010: Anforderungen an Farbstoffsolarzellen in Gebäudefassaden“

Für eine weitere Konkretisierung Technologie-Roadmap für Farbstoffsolarzellenanwendungen wurde insbesondere der Anwendungsbereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik weiter vertieft und ein Marktszenario (siehe oben) sowie eine Produkt-Roadmap mit dem Zeithorizont 2010 erstellt, die konkrete Entwicklungsvorgaben für die Nutzung von Farbstoffsolarzellen in Gebäudefassaden enthält.

1.2 Arbeitspaket 2: Lebenszyklusanalyse für ausgewählte Anwendungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine Integrierte Produktpolitik

Ziel

Ziel des Arbeitspakets 2 war es, mögliche Umweltwirkungen einer Anwendung der Farbstoffsolarzellen (FSZ) zu ermitteln und ggf. Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung der Technologie zu geben.

Vorgehensweise

Eingebettet in eine Innovations- und Technikanalyse (ITA) diente die Analyse der Umweltwirkung im Rahmen von ColorSol der Ermittlung von Hemmnissen bei der Anwendung und Verbreitung der Farbstoffsolarzellentechnologie aus Umweltsicht und der Entwicklung von Lösungen zu deren Überwindung. Die Farbstoffsolarzellentechnologie soll einen Beitrag zum Schutz der natürlichen Ressourcen leisten unter Berücksichtigung der ökonomischen und sozialen Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung. Anhand von Leitfragen wurden bereits in einem frühen Entwicklungsstadium die potenziellen Umweltwirkungen abgeschätzt und Impulse für ein ökoeffizientes Produktsystem gegeben. Dabei kamen in unterschiedlicher Ausprägung Methoden der Integrierten Produktentwicklung (IPP), der Ökobilanzierung und der umweltgerechten Produktentwicklung zum Einsatz.

Für die in den Anwendungsbereichen entwickelten Anwendungsszenarien wurde eine Analyse des Produktlebenszyklus auf Basis einer vereinfachten Umweltwirkungsbewertung durchgeführt. Dieser Schritt sollte sicherstellen, dass die entwickelten Produkte auf Farbstoffsolarzellen-Basis über den Lebenszyklus betrachtet zu Ressourceneinsparungen beitragen und damit eine gegenüber herkömmlichen Solarzellen verbesserte Ressourceneffizienz aufweisen.

Für die Betrachtung der Umweltwirkungen von Solarzellen reicht eine rein energetische Analyse nicht aus, vielmehr ist eine Kombination verschiedener Methoden aus dem Bereich der Umweltwirkungsbewertung von Produkten bzw. Technologien erforderlich. Somit wurden bei der Umweltwirkungsbewertung folgende Betrachtungsebenen definiert:

- Betrachtung der Inhaltsstoffe und der verwendeten Materialien
- Betrachtung der Produktionsprozesse
- Erweiterung der Betrachtungen auf den kompletten Lebenszyklus

Diese Betrachtungsebenen erfordern unterschiedliche Teilanalysen mit entsprechenden Anforderungen an benötigter Datenmenge/ -qualität, usw. Mit Hilfe des hierzu am Anfang des Projektes entwickelten Konzepts (vgl. Abbildung 6) wird die Umweltwirkung anhand von mehreren Einzelmethoden untersucht, die, miteinander verzahnt, die vereinfachte Ökobilanz ergeben.

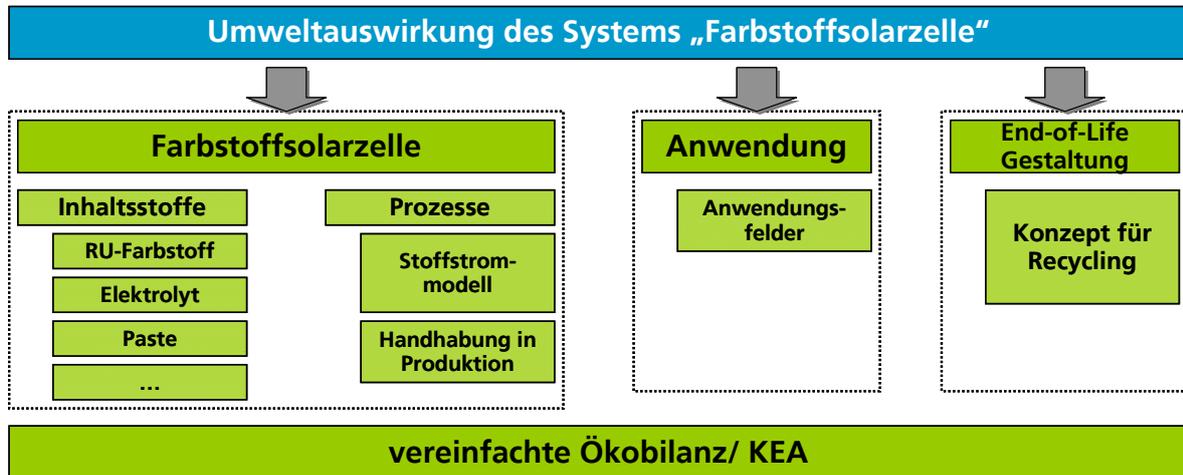


Abbildung 6: Konzept der Umweltwirkungsbewertung

Im Fortgang der Arbeiten stellte sich die Betrachtung der Umweltwirkungen bzgl. Inhaltsstoffe, insbesondere Farbstoff und Elektrolyten, die Durchführung einer Stoffstromanalyse, die Ermittlung von Recyclingmöglichkeiten sowie die Analyse der benötigten Energieaufwände als wesentlich zur Ermittlung der Umweltwirkung der FSZ heraus. Im Folgenden werden zentrale Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengefasst dargestellt:

Ergebnisse

1) Umweltwirkungen der Inhaltsstoffe

Zunächst wurden die Umweltwirkungen einzelner Inhaltsstoffe (Ruthenium, Elektrolyt, Pastenbestandteile) mittels Checklisten qualitativ bewertet, indem sie hinsichtlich Materialintensitäten und Schadstoffpotentiale analysiert wurden. Hier stellten sich das seltene Platingruppenmetall Ruthenium und der Elektrolyt als potenziell besonders relevante Stoffe heraus. Daher wurde Ruthenium als Teil des Farbstoff-Komplexes vertieft untersucht, indem seine Verfügbarkeit als Rohstoff und mögliche Umweltwirkungen analysiert wurden (vgl. Projektbericht Lutz et al. 2007). Weiterhin wurde in einer Toxizitätsanalyse im Rahmen eines Unterauftrags der ausgewählte Elektrolyt analysiert.

Verfügbarkeit von Ruthenium und Umweltrelevanz vom Farbstoff sowie von Platin

Ruthenium ist nach Platin und Palladium das am häufigsten vorkommende Platinmetall und war lange Zeit das günstigste Metall dieser Gruppe. Es wird vor allem in der Elektronikindustrie, hauptsächlich als Bestandteil von Halbleiterbauteilen, in der chemisch-technischen Industrie in speziellen Katalysatoren und als Bestandteil der Beschichtung von Titan-Anoden in der Chloralkali- und der Elektro-chemischen Industrie genutzt.

Die Nachfrage nach Ruthenium wird laut einer Prognose des Londoner Edelmetallhändler Johnson Matthey in den nächsten Jahren vermutlich weiter steigen (Matthey 2008). Dieser Anstieg wird begründet durch starke Zunahme der Nachfrage im Bereich der Elektronikindustrie, dem bislang größten Verbraucher von Ruthenium. Das momentan verhältnismäßig niedrige Preisniveau müsste aber auch in Zukunft prinzipiell gehalten werden, sollte es nicht zu einer gewaltigen Steigerung der Nachfrage kommen. Diese könnte sich langfristig durch den Einsatz von Ruthenium in der Brennstoffzelle ergeben, diese Aussage ist aber mit großen Unsicherheiten verknüpft. In Zusammenhang mit dem niedrigen Gesamtangebot sind weiterhin starke Preisschwankungen zu erwarten (Matthey 2008).

Der Ruthenium-Farbstoff *cis*-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II) – kurz N-3 genannt - ist ein essentieller Bestandteil der FSZ. Die Verfügbarkeit von Ruthenium stellt somit einen wichtigen Aspekt für die kommerzielle Herstellung und Vermarktung von FSZ dar. Beispielsweise würde für die Produktion von 100.000 Modulen der Größe von 0,6 m² insgesamt 42 kg Ruthenium-Farbstoff benötigt, mit einem Anteil von ca. 4,2 kg Ruthenium. In dieser Größenordnung entstünde bei steigender Weltjahresproduktion kein Engpass. Dies bestätigt eine aktuelle Untersuchung des Fraunhofer ISI (Angerer et al. 2009), nach welcher die prognostizierte Nachfrage in Verbindung mit der Farbstoffsolarzellen-Technologie mengenmäßig auch in Zukunft (2030) unkritisch ist, hinsichtlich Rutheniumverfügbarkeit.

Aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes und Literaturrecherchen lässt sich feststellen, dass vom Rohstoff Ruthenium und vom Farbstoff N-3 keine gesundheitlichen oder sicherheitstechnischen Risiken ausgehen. Vor allem erbgutschädigende Langzeiteffekte des Farbstoffes können aufgrund eines durchgeführten AMES-Testes ausgeschlossen werden (de Vries et al. 2000). Ruthenium hat – wie die anderen Platinmetalle auch – in doppelter Hinsicht eine hohe Umweltrelevanz. Zum einen führt ihr Einsatz häufig zur Verbesserung der Energieeffizienz eines Produktes oder einer Dienstleistung und zur Verringerung von Schadstoffemissionen bspw. im Autokatalysator. Zum anderen erfordert die bergbauliche Gewinnung aus rohstoffarmen, meist schwefelhaltigen Erzen sowie die aufwändigen Aufbereitungsprozesse einen hohen Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen hohen Mengen an Emissionen und Abfällen.

Negative Umweltwirkungen können sich bei Solarzellen eher in vor- oder nachgelagerten Stufen des Lebenszyklus der Farbstoffsolarzelle ergeben, also bei den Rohstoffbereitstellungen, der Produktion oder dem Recycling. Der Ressourcenverbrauch im Bereich Rohstoffbereitstellungen lässt sich mit der Methode „Materialintensität pro Serviceeinheit“ (MIPS) abschätzen (Schmidt-Bleek 1998). Dabei zeigt sich, dass der hohe Aufwand für die Rutheniumbereitstellung durch die insgesamt nur geringen eingesetzten Mengen relativiert wird und Ruthenium nur einen geringen Anteil am MIPS-Wert der gesamten Zelle hat. Dasselbe gilt für Platin, das auch ein wichtiger Bestandteil der Farbstoffsolarzelle

ist. Unter den für die Farbstoffsolarzelle verwendeten Stoffen / Materialien haben das Platin und Ruthenium die vergleichsweise höchsten Materialintensitätswerte, erklärbar mit notwendigen Abbau und Aufbereitungsschritten. Da aber im System der Farbstoffsolarzelle mengenmäßig deutlich mehr Glas eingesetzt wird, hat dieses insgesamt die höchste Ressourcenrelevanz.

Umweltrelevanz des Elektrolyten (Ionische Flüssigkeit)

Mögliche Einsatzgebiete der FSZ lassen einen direkten Kontakt der Inhaltsstoffe mit Menschen nicht ausschließen. Dies gilt für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen-Modulen und dann, wenn Module in der Nutzungsphase beschädigt werden und somit Farbstoff und Elektrolyt in die Umgebung freigesetzt werden können. Dadurch werden Fragen nach Gesundheits- und Sicherheitsaspekten sowie Umweltverträglichkeit der verwendeten Inhaltsstoffe aufgeworfen. Daher wurde für den im Rahmen des Projekts ausgewählten Elektrolyten eine Toxizitätsanalyse in Auftrag gegeben.

Hierfür wurde ein Elektrolyt aus den folgenden Bestandteilen ausgewählt (vgl. AP5):

- 1-Methyl-3-propylimidazolium iodid,
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluormethansulfonat,
- N-Butylbenzimidazol,
- Iod,
- Guanidinium thiocyanat.

Die Einzelkomponenten und auch der fertige Elektrolyt wurden von der Fa. IoLiTec hergestellt und der Fa. Campus Technologies GmbH, Freiburg, für die Tests zur Verfügung gestellt. Dort wurden folgende Tests durchgeführt:

- Ein Test für die biologische Abbaubarkeit (OECD 301 D) und
- ein Test für Mutagenität / Cancerogenität (OECD 471).

Prüfungsgegenstände des OECD 301 D-Tests waren alle Einzelkomponenten ohne Iod. Der Test wurde gemäß OECD-Guidelines for the Testing of Chemicals 302 D (Closed Bottle Test) durchgeführt und dauerte 28 Tage. Dabei wurde die Prüfung des Testgegenstandes jeweils viermal durchgeführt und die Sauerstoffelimination erfolgte mit zwei Messprinzipien (Elektrode und optischer Sensor) zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration. Die Ergebnisse bescheinigen, dass die Prüfungsgegenstände „nicht toxisch“ und „nicht leicht abbaubar“ sind.

Prüfungsgegenstände des OECD 471-Tests mit *Salmonella typhimurium* (Bacterial Reverse Mutation Test, Ames Test) waren 1-Methyl-3-propylimidazolium iodid, 1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluormethansulfonat, Guanidinium thiocyanat sowie einer Mischung aus 1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluormethansulfonat und N-Butylbenzimidazol. Im Mutagenitätstest erfolgt die Exposition von histidin-auxotrophen Bakterien mit dem Prüfungsgegenstand auf Agar mit Histidin. Das mutagene Potential kann nun über die Anzahl der rückmutierten Bakterien, die bezüglich Histidin wieder prototroph sind, quantifiziert werden. Die Studie, die mit einer unabhängigen Wiederholung der Experimente durchgeführt wurde, ergab mit und ohne metabolische Aktivierung (S9, Aroclor induziertes Rattenleberhomogenat) keine Hinweise auf mutagene Effekte der Prüfungsgegenstände bis zu einer Testkonzentration von 5 mg pro Platte. Bei reinem N-Butylbenzimidazol wurden keine mutagene Effekte bis zu einer Testkonzentration von 1 mg pro Platte festgestellt. Die in einem Bakterienstamm erzielten Ergebnisse können hier mögliche mutagenen Effekte nicht vollständig ausschließen.

Zusammengefasst bewertet die Toxizitätsanalyse den verwendeten Elektrolyten als „nicht toxisch“, „nicht leicht abbaubar“ und „nicht mutagen“.

2) Stoffstromanalyse der Farbstoffsolarzellen-Herstellung und Analyse des Energiebedarfs der Farbstoffsolarzelle

Um die bei der Herstellung von FSZ-Modulen benötigten Materialien und Energien ganzheitlich darzustellen, wurde eine Stoffstromanalyse der Herstellprozesse durchgeführt und mit Hilfe der Software Umberto[®] abgebildet und modelliert. Die Analyse basierte auf Input-Output-Abschätzungen zu den eingesetzten Stoffen. Dabei wurden einerseits vorhandene projektinterne Daten aus dem Labormaßstab auf den Maßstab eines angenommenen industriellen Produktionsprozesses hochgerechnet. Andererseits wurden Vergleichsdaten aus anderen Quellen (Hersteller, Forschungseinrichtungen etc.) recherchiert.

Mit dem erstellten Modell steht ein flexibles Werkzeug zur Verfügung, mit dessen Hilfe sich die Stoffströme der Farbstoffsolarzelle über ihren gesamten Lebensweg unter veränderbaren Rahmenbedingungen darstellen lassen. Dabei können wichtige auftragsspezifische Rahmenbedingungen über Parameter variiert werden, womit jederzeit auf veränderte Situationen reagiert werden kann.

Die Daten der mithilfe des Umberto[®]-Modells erstellten Stoff- und Energiebilanz sollten aber zum z. T. noch als vorläufig angesehen werden. Dies liegt zum einen daran, dass das Modell des Lebensweges der Farbstoffsolarzelle noch nicht vollständig ist, da einige Verfahren und Materialien wie z.B. die Herstellung des Vorproduktes Elektrolyt oder die Lebensphase des End-of-Life noch nicht abschließend geklärt sind. Weiterhin sind auch bei bereits bekannten Verfahren und Materialien exakte Daten wie z.B. die Parameter der verschiedenen

Maschinen schwer zu ermitteln, da es noch keine Pilotproduktion gibt und deshalb nur auf Basis von Abschätzungen der beteiligten Partner ermittelt werden können. Das Stoffstrommodell kann jedoch später leicht ergänzt werden, sobald die nötigen Informationen vorhanden sind. Dabei müssen auch die Vorketten der im Produktionsprozess benötigten Stoffe ermittelt werden.

Da der Energiebedarf ein zentrales Kriterium der Technologie darstellt, wurde anschließend eine auf dem Stoffstrommodell aufbauende Analyse des kumulierten Energie Aufwands (KEA) entlang des gesamten Lebenszyklus erstellt. Der KEA gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwandes an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. dieser ursächlich zugewiesen werden kann. Dieses ermöglicht, die Berechnung der Energieaufwendungen entlang des gesamten Lebenszyklus der FSZ in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie Modulgröße, Zahl der zu fertigenden Module, Aufstellort, Installationsart usw. Durch den ermittelten KEA ist es möglich, Kenngrößen wie die energetische Amortisationszeit, den Erntefaktor und den spezifischen KEA zu bestimmen.

Um einzelne Bereiche bei der Produktion und im Lebenszyklus von FSZ genauer zu beleuchten und dabei Schwachpunkte und Verbesserungspotentiale aufzudecken, wurde eine Sensitivitätsanalyse in Form von verschiedenen Szenarien durchgeführt. Ausgehend von einem Standard-Szenario, in dem alle Parameter dem momentanen Stand der Technik sowie den realistischsten Installationsbedingungen entsprechen, wurde in den übrigen Szenarien das Augenmerk immer auf einen bestimmten Parameter, wie etwa Installationsart, Wirkungsgradveränderung, Aufstellort oder Ausrichtung, der FSZ gelegt, um schließlich ein Best-Case und ein Worst-Case Szenario zu bilden. In den Szenarien wurde die Produktion von 1000 Modulen der Größe 30 x 30 cm² betrachtet. Für das Standard-Szenario wurde dadurch eine energetische Amortisationszeit von 29,8 Monaten, ein Erntefaktor von 4 und ein spezifischer KEA von 0,25 kWhPrim/kWhel berechnet.

In anderen Szenarien hat sich gezeigt, dass eine Installation der FSZ-Module auf einem Hausdach, wie es bei herkömmlichen Modulen oft der Fall ist, sich energetisch langsamer amortisiert als eine Installation der FSZ Module als Fassadenverkleidung. Dies liegt daran, dass bei letzterem die bestehende Verkleidung durch die Module ersetzt werden kann, auf dem Dach aber zuerst eine Halterung angebracht werden muss. Durch eine Installation der Module in Südeuropa anstatt in Deutschland wird der energetische Mehraufwand für den

Transport der Module, vom derzeitig geplanten Produktionsort in Bretten zum Aufstellort in Rom, durch den größeren Stromertrag aufgrund der geographisch bedingten höheren Globalstrahlung kompensiert. Es ist damit zu rechnen, dass sich der Wirkungsgrad sowie die Lebensdauer der FSZ durch weitere Forschungsmaßnahmen noch erhöhen. Dies würde zu einem Mehraufwand für zu

installierende Wechselrichter führen, der durch den höheren Ertrag kompensiert wird und sogar einen Energieüberschuss produziert. Die möglichen Bandbreiten der wichtigsten Kenngrößen wie der energetischen Amortisationszeit zeigt die folgende Tabelle 2.

Tabelle 2: Bandbreite der wichtigsten Kenngrößen der Szenarien

Szenario	KEA gesamt [MJ]	Ertrag/ Jahr MJPrim / a	Spez. KEA [kWhPrim/kWhel]	EF	EAZ [Monate]
Standardfall	96176	38659	0,249	4,02	29,85
Dachaufständerung	138868	51545	0,269	3,71	32,33
Serienproduktion	65159	38659	0,169	5,93	20,23
Aufstellort	107523	57068	0,188	5,32	22,61
Wirkungsgrad	99233	54123	0,183	5,45	22,00
Lebensdauer	110342	38659	0,143	7,01	34,25
Ausrichtung	96176	33505	0,287	3,84	34,45
Glasfassade	86780	38659	0,225	4,45	26,93
Worst-Case	100768	30314	0,332	3,01	39,89
Best-Case	74328	54123	0,137	7,28	16,48

KEA: Kumulierter Energieaufwand, EF: Erntefaktor, EAZ: Energetische Amortisationszeit

Die folgende Tabelle 2. zeigt den Vergleich der FSZ mit anderen Photovoltaik-Technologien.

Tabelle 3: Vergleich herkömmlicher Photovoltaik-Technologie mit FSZ (Werte für FSZ: eigene Berechnung, Werte für andere Technologien: Quaschnig 2008)

Solarzellentyp:	Erntefaktor	Energetische Amortisationszeit in Monaten
mono-Si:	5,5	55
poly-Si:	8	38
amorph:	11	28
CIS:	20	15
FSZ	3 bis 7	17 bis 40

In dieser Analyse hat sich gezeigt, dass der KEA der FSZ, aufgrund der wenig energieintensiven Produktion der Module, mit Werten zwischen 65 und 114 GJ, je nach Szenario, relativ gering ist. Dadurch ist trotz des niedrigen Wirkungsgrades der FSZ von 5 Prozent im Vergleich zu anderen Solarzellen, z.B. haben mono-Si-Zellen Wirkungsgrade von über 10 Prozent, die Kennzahlen der FSZ zum Teil

günstiger als bei anderen Solarzellen. Der Erntefaktor der FSZ schwankt zwischen 3 und 7. Die Erntefaktoren anderer Solarzellen schwanken je nach Typ zwischen 5 und 20. Dass der Erntefaktor der FSZ vergleichsweise gering ausfällt, liegt vor allem an ihrer kurzen Lebensdauer von 10 Jahren. Bei der energetischen Amortisationszeit zeigt sich, dass die FSZ mit 17 bis 40 Monaten je nach Szenario im Vergleich zu anderen Solarzellen mit 15 bis 55 Monaten, technisch konkurrenzfähig ist.

Da die FSZ bislang noch nicht in Serie produziert wird und sich die Testproduktion noch im Aufbau befindet, wurde auf unterschiedliche Datenquellen zurückgegriffen. Teilweise wurden Energieumsätze abgeschätzt bzw. von vergleichbaren Prozessen verwendet, um eine ganzheitliche Bilanzierung der Energieaufwendungen zu ermöglichen. Beim Vergleich von Kenngrößen verschiedener Technologien ist stets darauf zu achten wie die Bilanzgrenzen des ermittelten KEA definiert wurden. Zudem sollte die Qualität und Herkunft der Daten bekannt sein. Auch in dieser Untersuchung hat sich die Erfassung von Energieumsätzen in manchen Umwandlungsprozessen als teilweise schwierig erwiesen.

Aufgrund des geringen Energieaufwandes und Ressourceneinsatzes bei der Herstellung von FSZ tragen Aufwendungen für Transport einen prozentual größeren Betrag zum KEA bei als bei anderen Solarzellen. Es hat sich gezeigt, dass die Energieaufwendungen für den Transport von einzelnen Komponenten und der fertigen Module in der Summe über 20 Prozent des gesamten KEA ausmachen. Wenn z.B. das in großen Mengen benötigte TCO-Glas nicht aus den USA importiert werden müsste, sondern in der Nähe der Produktion der FSZ-Module hergestellt werden würde, wäre der KEA um ca. 10 Prozent kleiner und damit die Kenngrößen deutlich günstiger. Zudem wirkt sich eine Steigerung des Stromertrages durch eine Erhöhung der Lebensdauer und des Wirkungsgrades sowie eine optimale Ausrichtung der Module aufgrund des geringen KEA deutlich stärker auf die Kenngrößen aus als bei anderen Solarzellen. Durch eine Steigerung des Wirkungsgrades von 5 auf 7 Prozent würde sich die energetische Amortisationszeit um über 25 Prozent verkürzen.

3) Recyclingkonzepte für die Farbstoffsolarzelle

Zielstellung der Analyse war es, ein Recyclingkonzept für die FSZ zu entwickeln. Dabei konnte auf den bisherigen Ergebnissen etwa zur Umweltrelevanz einzelner Stoffe aufgebaut werden. Es stellte sich heraus, dass die Glasplatten von besonderer Bedeutung bzgl. der recyclingrelevanten Fragestellungen zur Wiederverwertbarkeit oder Entsorgung sind, da sie den größten Massenanteil haben und die höchsten Kosten verursachen. Der Farbstoff-Rutheniumkomplex wird als nicht gefährlicher Stoff eingestuft (vgl. Abschnitt zum Farbstoff), sollte aber wegen des hohen Preises möglichst weitgehend zurück gewonnen und wieder in den Stoffkreislauf eingeführt werden.

Die Abfallmengen stellen auf Grund des stabilen und langlebigen Modulaufbaus derzeit noch kein Entsorgungsproblem dar. Würden bspw. jährlich 85.000.000 Module der Größe 60 cm x 100 cm produziert, dann würden Abfallmengen von bis zu 270000 Tonnen zu erwarten sein. Damit würden sie noch bei ca. 3 – 4 Zehnerpotenzen unter dem Abfallaufkommen anderer Produkte (Elektronikschrott, Glas, Kunststoff) liegen.

Um die anfallenden Farbstoffsolarzellen umweltfreundlich und ökonomisch sinnvoll zu behandeln, wurden Recycling- und Entsorgungsvarianten incl. die zu erwarteten Kosten und ökologischen Auswirkungen untersucht. Die Strategien für ein fachgerechtes Recycling von Farbstoffsolarzellen werden durch Berücksichtigung des Standes der Technik, bezüglich der Aufbereitung und Wiederverwendung der konventionellen Solarzellen und Flachbildschirmen (LCD), entwickelt. Grundsätzlich stehen mehrere Verfahren zur Verfügung: Mechanische Zerkleinerungsverfahren zur Herstellung von Sandersatz; thermische Behandlung zur Entfernung der giftigen Elektrolyte und Platinpasten und Herstellung von Glasscherben und ein sukzessiver chemischer Aufbereitungsprozess nach der Zerkleinerung der Module zur Zurückgewinnung der verschiedenen wertvollen Materialien. Eine Variante ist es, die alten Farbstoffe und Elektrolyte unter der Einwirkung von Ultraschall zu entfernen und gegen neue Stoffe auszutauschen. Das Outputprodukt ist damit kein Sekundärmaterial, sondern es entstehen weiterverwendbare Solarzellen.

Ein Recycling der Farbstoffsolarzellen erscheint auf Grund dieser Untersuchungen theoretisch machbar. Die verschiedenen Varianten weisen Vor- und Nachteile unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten auf. Das umweltfreundlichste Verfahren ist die Herstellung von Sandersatz, dabei wird keine Umweltbelastung außer ganz kleinen Mengen von Staub und Glasscherben entstehen. Aber der wesentliche Nachteil liegt auf der ökonomischen Seite. Die ökonomisch günstigste Variante ist der chemische Aufbereitungsprozess zur Zurückgewinnung des wertvollen Materials.

Fazit

Die durchgeführte Umweltwirkungsbewertung diente der Analyse von Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzellen, um im Projektfortgang diesbezüglich kontinuierlich Handlungsempfehlungen zur Weiterentwicklung aussprechen zu können und damit letztendlich eine Richtungssicherheit zu haben. Hierfür wurden mehrere Methoden aus dem Bereich der Umweltwirkungsbewertung von Produkten bzw. Technologien kombiniert und adaptiert.

Der frühe Beginn der Analyse im Projektverlauf limitierte die Qualität und Quantität der für die Betrachtung erforderlichen Daten. Mit zunehmender Festlegung auf bestimmte Parameter im Projektverlauf stieg die Aussagekraft der einzelnen Analysen.

Da im System der Farbstoffsolarzelle mengenmäßig am meisten Glas eingesetzt wird, hat dieses auch insgesamt die höchste Ressourcen- sowie Recyclingrelevanz. Der ausgewählte Elektrolyt gilt als nicht toxisch und nicht mutagen. Mit der Verwendung des Farbstoffs sind ebenfalls keine gesundheitlichen oder sicherheitstechnischen Risiken verbunden. Somit halten sich insgesamt die ermittelten Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle in Grenzen. Die Betrachtung des Energieaufwands bescheinigte dem Transport, der Lebensdauer, der Ausrichtung der Module sowie insbesondere dem Wirkungsgrad bestimmenden Einfluss auf die Amortisation, so dass diese Aspekte verstärkt Berücksichtigung im weiteren Projektverlauf fanden.

1.3 Arbeitspaket 3: Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft

Die Solarwirtschaft stellt eine junge Branche mit spezifischen Marktrahmenbedingungen und großer Innovationsdynamik dar. Bis dato sind die betrieblichen und zwischenbetrieblichen Innovationsprozesse von Unternehmen der Solarwirtschaft und die Art und Weise, wie hier Innovationsmanagement sowie brancheninterne und branchenübergreifende Kooperationen betrieben werden, kaum untersucht.

Ziel

Ziel von AP 3 war es, den Stand des Innovationsmanagements in der deutschen Solarwirtschaft zu erfassen, nationale und internationale Best Practice-Ansätze leistungsfähiger Innovationssysteme und Innovationskooperationen im Bereich von Solarwirtschaft und Photovoltaik zu identifizieren sowie die Erfolgsfaktoren der Produktinnovation in der Solarwirtschaft herauszuarbeiten

Vorgehensweise

AP 3 umfasste drei Teile:

1. Eine internationale Untersuchung von Innovationssystemen und Innovationskooperationen der Solarwirtschaft
2. Eine Befragung deutscher Unternehmen der Solarwirtschaft zu Art, Umfang und Methoden des Innovationsmanagements
3. Vertiefende Untersuchung von Roadmapping-Initiativen in der Solarwirtschaft

Ergebnisse

Ergebnisse der internationalen Untersuchung von Innovationssystemen und Innovationskooperationen der Solarwirtschaft

Bei der internationalen Untersuchung von Innovationssystemen und Innovationskooperationen der Solarwirtschaft wurden zwei Innovationssysteme im Bereich der Farbstoffsolarzellentechnologie in Japan und Australien analysiert. Die Gründe für die Auswahl dieser beiden Innovationssysteme sind:

- Japan und Australien zählen seit vielen Jahren zu den wichtigsten außereuropäischen Ländern mit aktiver Forschung und Entwicklung im Bereich der Farbstoffsolarzelle und damit zu den stärksten Konkurrenten für die europäischen Akteure.
- Die beiden Innovationssysteme Japan und Australien sind hinsichtlich der vorliegenden Rahmenbedingungen, der involvierten Akteure sowie auch der verfolgten Kommerzialisierungsstrategie sehr unterschiedlich und zeigen somit ein breites Spektrum möglicher Innovations- und Kommerzialisierungsstrategien auf, deren Auswertung für das Vorhaben ColorSol von Interesse ist.
- Über das Projekt ColorSol und seine Akteure bestanden bereits Kontakte zu Akteuren der beiden Innovationssysteme, was den Zugang zu Informationen und die Gewinnung von Experten für Interviews erleichterte.

Zentrale Ergebnisse der Untersuchung des Innovationssystems in Japan sind:

- Bedingt durch die jahrzehntelange Förder- und Entwicklungstradition zur Photovoltaik hat sich in Japan ein sehr stabiles Investitionsklima für die Entwicklung von PV-Technologien etabliert. Die Förderung der Photovoltaik wird in Japan auch als eine gezielte Industrie- und Innovationspolitik gesehen und hat dazu geführt, dass viele traditionelle Industrieunternehmen mit langfristigem Engagement in die Forschung und Entwicklung von Photovoltaik eingestiegen sind.
- Durch die konsensuale Erarbeitung gemeinsamer Entwicklungsziele im Rahmen von Roadmapping und politischen Beratungsprozessen ist ein gemeinsames Verständnis zwischen Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Forschung entstanden, das den grundsätzlichen Stellenwert der Photovoltaik als ein Beitrag zur Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen und zum Klimaschutz anerkennt.
- Durch die gemeinsame Erarbeitung langfristiger Entwicklungsziele, die für die Akteure eine hohe Verbindlichkeit besitzen, ist es gelungen, das Engagement auch unter teilweise schwierigen Marktbedingungen aufrechtzuerhalten. Dies gilt insbesondere auch für die Forschung im Bereich neuer, marktferner PV-Technologien. Die Forschung und Entwicklung im Bereich organischer Photovoltaik wurde und wird als eine Investition in die Zukunft und als langfristige Aufgabe gesehen.

Die genannten Merkmale haben mit dazu geführt, dass japanische Photovoltaikunternehmen zu den führenden Akteuren auf dem Weltmarkt zählen, wenngleich diese Position in den letzten Jahren durch eine Modifikation der nationalen Forschungs- und Förderpolitik und die wachsende Konkurrenz in anderen asiatischen Staaten (z. B. China und Korea) sowie in Europa geschwächt wurde.

Für die Entwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie folgt daraus, dass, obwohl die Ursprünge der Technologie nicht in Japan liegen, diese mit staatlicher Unterstützung und großer Kontinuität weiterentwickelt wurde. Japanische Unternehmen zählen daher bezüglich der Forschung, Entwicklung und Kommerzialisierung weltweit zu den wichtigsten Akteuren auf dem Gebiet der Farbstoffsolarzelle. Sie besitzen insbesondere durch eigene Testinstallationen Erfahrungen mit der Langzeitstabilität von Farbstoffsolarzellen unter realen Einsatzbedingungen.

Die Untersuchung des Innovationssystems in Australien fokussierte auf einen zentralen Akteur im Bereich der Farbstoffsolarzelle, die Firma Dyesol. Zentrale Ergebnisse der Untersuchung sind:

Die Firma Dyesol hat ein Netzwerk von Akteuren zur Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie aufgebaut, das sich aus Forschungseinrichtungen und Unternehmen zusammensetzt. Wichtigstes Ziel des Netzwerks ist die Weiterentwicklung der Technologie und potenzieller Anwendungen der Farbstoffsolarzelle. Als Initiator und zentraler Akteur des Netzwerks versucht Dyesol so, eine beherrschende Stellung auf dem Markt zu erlangen.

Dyesol schlägt den Weg einer „Diversifizierung“ der Kooperationen bzw. Joint Ventures mit Anwendungspartnern ein und kooperiert mit relativ vielen Partnern weltweit, wobei das Netzwerk momentan noch weiter ausgebaut wird. Dyesol könnte sich als kleines Unternehmen mit dieser Komplexität übernehmen. Weiterhin ist zu beobachten, inwiefern Ungleichgewichte in der Kooperation mit größeren Unternehmen entstehen können.

Der Geschäftserfolg von Dyesol hängt davon ab, ob es den Anwendungspartnern (insbesondere Corus und G24i) gelingen wird, stabile Produkte und Anwendungen von Farbstoffsolarzellen herzustellen und in größeren Mengen am Markt zu verkaufen, insbesondere für das Anwendungsgebiet der gebäudeintegrierten Photovoltaik. Hier muss sich die FSZ gegenüber anderen Dünnschichttechnologien behaupten, die schon als kommerzielle Produkte angeboten werden (z. B. ASI THRU von Schott Solar).

Ergebnisse der Befragung deutscher Unternehmen der Solarwirtschaft

Die Befragung deutscher Solarunternehmen über die Art und Weise ihres Innovationsmanagements ergab, dass viele der in der Innovationsforschung derzeit postulierten Merkmale der „Era of Open Innovation“ auch auf die

Photovoltaikbranche zutreffen. Daraus ergibt sich für die Gestaltung des Innovationsprozesses die Notwendigkeit, externe Ideen und Innovationen für das Unternehmen zu erschließen sowie eine Umsetzung interner Ideen und Initiativen auch unternehmensextern zu ermöglichen. Das sogenannte „Corporate Venturing“ dient dabei als integraler Bestandteil des Innovationsmanagements dazu, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Weiterhin zeigen die Befragungsergebnisse, dass die Mehrzahl der befragten Unternehmen bereits erfolgreich bemüht ist, neue Geschäftsfelder zu erschließen, indem sie den Innovationsprozess offen gestalten. Verschiedenste Formen und Instrumente des sogenannten „Corporate Venturing“ (CV) kommen dabei zum Einsatz und werden mit unterschiedlicher Intensität genutzt. Ein systematischer Corporate Venturing-Prozess findet sich allerdings nur in wenigen PV-Unternehmen. Dies bedeutet, die verschiedenen Instrumente des CV werden teilweise unkoordiniert eingesetzt und es wird häufig lediglich auf sich zufällig ergebende Chancen reagiert, anstatt dass gezielt auf ihr Entstehen hingearbeitet wird. Ohne eine Koordination der einzelnen Instrumente und Formen des CV werden die Möglichkeiten dieses Konzepts nicht in vollem Umfang ausgeschöpft. Dass nur wenige Unternehmen ein systematisches CV betreiben, birgt daher als Potenzial für zukünftige Verbesserungen.

Ergebnisse der vertiefenden Untersuchung von Roadmapping-Initiativen in der Solarwirtschaft

Deutsche Forschungsinstitute und Unternehmen zählen weltweit zu den zentralen Akteuren in der Photovoltaik, zudem ist Deutschland derzeit der international wichtigste Markt für den Absatz von Photovoltaiktechnik. Diese Erfolgsgeschichte kann auf eine langfristige Orientierung in der Forschung und Entwicklung sowie die Schaffung einer stabilen Einspeisevergütung und marktlicher Rahmenbedingungen zurückgeführt werden. Doch wie soll sich die deutsche Photovoltaikforschung und -Industrie mittel- bis langfristig weiter entwickeln? Folgende Fragen skizzieren die Herausforderung der nächsten Jahre:

- Welche Forschungs- und Entwicklungsthemen sind neben der Optimierung von Wirkungsgraden und Produktionskosten sowie neuen Halbleitermaterialien relevant?
- Welche komplementären Technologien (Energiewandlung und -Speicherung, Netzentwicklung und -Management, etc.) sind für die Erschließung zusätzlicher (Export-)Märkte notwendig?
- Welchen Beitrag kann die Photovoltaik zur Erreichung der EU-Ziel (Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf 20 Prozent bis 2020) leisten und wie kann dieses Ziel erreicht werden?

- Wie können die daraus resultierenden mittel- bis langfristig die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sinnvoll zwischen den Akteuren aus Forschung, Wirtschaft und Politik abgestimmt werden?
- Welche Anforderungen und Effekte ergeben sich daraus für den Arbeitsmarkt und die Ausbildung von qualifiziertem Personal?

Wie die Untersuchung des Borderstep Instituts im Rahmen von AP 3 zeigt, sind ein Großteil der interviewten Photovoltaik-Experten aus Industrie, Forschung und Politik der Auffassung, dass es zur Beantwortung dieser Fragen sowie zur Entwicklung einer Langfriststrategie für die Photovoltaik in Deutschland notwendig und sinnvoll wäre, einen gemeinsamen „Roadmapping-Prozess“ anzustoßen. Vor diesem Hintergrund wird ein deutscher Abstimmungsprozess vorgeschlagen, der in Ergänzung zu den bestehenden Initiativen des BMU (siehe Glottertaler Gespräche und Strategiegespräche zur Photovoltaik), des BMBF (siehe z.B. Strategiepapier „Dünnschicht-Photovoltaik“) sowie der Photovoltaikbranche (BSW und EPIA) langfristig wichtige Fragestellungen für die Photovoltaik integriert, mit konkreten strategischen Zielsetzungen verbindet und Maßnahmen für Umsetzung und Monitoring formuliert.

2 Modul Kooperative Technologieentwicklung

2.1 Übersicht über das Modul Kooperative Technologieentwicklung

Im Projekt ColorSol[®] wurden Verfahren zur Herstellung von Farbstoffsolarmodulen aufskaliert und vom Labormaßstab (Größe 30 cm x 30 cm) in das Produktionsumfeld der Firma BGT Bischoff Glastechnik AG (Größe 60 cm x 100 cm) übertragen. Die wesentlichen Verfahrensschritte sind im Folgenden kurz beschrieben (vgl. auch Abbildung 7).

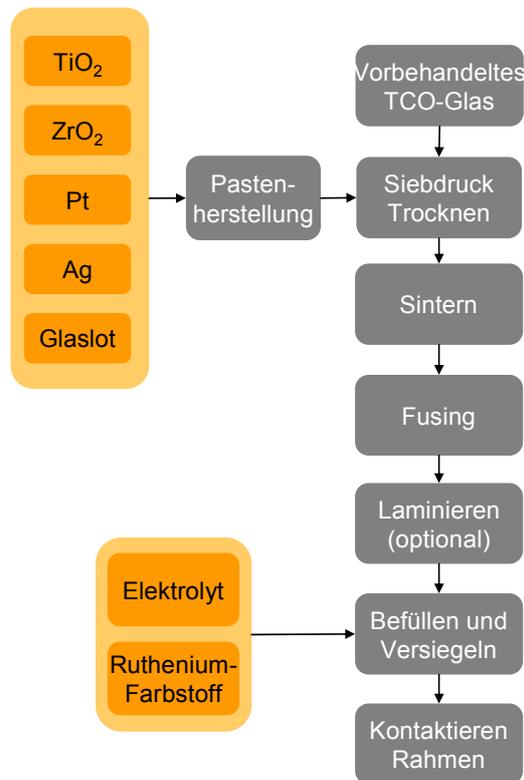


Abbildung 7: Herstellung von Farbstoffsolarmodulen

Als Substrat für Farbstoffsolarzellen dient mit einer leitfähigen Schicht (TCO) versehenes, strukturiertes und vorbehandeltes Glas. Auf dieses werden durch Siebdruck in mehreren Schritten funktionale Schichten aus TiO_2 , ZrO_2 , Platin, Silber und Glaslot aufgebracht. Hierfür werden spezielle Druckpasten benötigt, die im Rahmen des Projektes weiterentwickelt wurden. Zur Übertragung des Siebdrucks vom Labor am Fraunhofer ISE in das Produktionsumfeld von BGT mussten Druckverfahren und Pastenherstellung aufskaliert werden und Druckparameter optimiert werden. Es wurden Siebe mit unterschiedlichem Layout hergestellt und in Testreihen geeignete Siebgewebe ausgewählt, um die erforderlichen Präzision in Form von Schichtdicken und Kantenschärfen zu erreichen.

Nach dem Drucken und Trocknen der Schichten werden die Gläser schließlich bei ca. $580\text{ }^\circ\text{C}$ gesintert. Dabei entweichen die organischen Bestandteile aus den Pasten. Schließlich folgt der Fusingvorgang bei noch höheren Temperaturen, dabei wird der Schmelzpunkt des Glaslots erreicht. Durch das „Aufeinanderschmelzen“ der Glasplatten entstehen einzelne versiegelte Zellen mit einem definierten Abstand der Gläser.

Je nach Anwendung der Farbstoffsolarmodule, z.B. im Überkopfbereich, ist eine Konstruktion aus Verbundsicherheitsglas (VSG) vorgeschrieben. In diesem Fall ist auf das Modul eine weitere Scheibe mit PVB-Folie aufzulaminieren.

In den Hohlraum zwischen den Glasplatten werden nun Farbstoff und Elektrolyt eingefüllt und die Befüllöffnungen mit UV-aushärtendem Kleber versiegelt. Zur Automatisierung dieser Vorgänge wurde am Fraunhofer IAO eine Befüllmaschine entwickelt und gebaut. Schließlich werden in einem letzten Schritt die Module kontaktiert und in ein Rahmensystem eingebaut.

Im Projekt ColorSol® hat die Firma Pröll KG die Herstellung der wichtigsten Siebdruckpasten erfolgreich aufskaliert. Dazu wurden unterschiedliche Dispergiermethoden evaluiert und Druckeigenschaften optimiert. Glaslot-, Titandioxid- und Zirkondioxidpasten können nun in Kilogramm-Chargen hergestellt werden.

Als Elektrolyt wird eine ionische Flüssigkeit verwendet. Dabei handelt es sich um ein Material, das vollständig aus Ionen besteht und unterhalb von 100 °C im flüssigen Aggregatzustand vorliegt. Die Firma Iolitec hat im Projekt ColorSol® entsprechende ionische Flüssigkeiten entwickelt, angepasst und ihre Herstellung im Mikroreaktor erprobt.

Im weiteren Verlauf sind die Arbeiten im Einzelnen beschrieben.

2.2 Arbeitspaket 4: Entwicklung von Druckpasten für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen

Ziel

In diesem Arbeitspaket wurde die technologische Weiterentwicklung und Entwicklung von Druckpasten für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen geleistet. Bei der Herstellung der Siebdruckpasten wurde Verfahren und Geräte verwendet, die eine Aufskalierung der Pastenproduktion vom Labor- zum Kilogramm-Maßstab erlauben.

Vorgehensweise

Die technische Entwicklung der Firma Pröll KG gliedert sich in folgende Teilarbeitspakete.

AP 4.5.1: Entwicklung einer Glasreinigung für große Flächen

AP 4.5.2: Evaluierung der Dispergiermethoden der Siebdruckpasten

AP 4.5.3: Optimierung der Druckeigenschaften von Druckpasten für den industriellen Siebdruck

AP 4.5.4: Entwicklung von Siebdruckschichten mit guter mechanischer Haftung

AP 4.5.5: Entwicklung von langzeitstabilen Siebdruckpasten

AP 4.5.6: Optimierung der katalytischen Aktivität der Gegenelektrode (Bearbeitung durch die Cracow University of Technology CUT)

AP 4.5.7: Optimierung der elektrischen Eigenschaften der Vorderelektrode

AP 4.5.8: Entwicklung der Glaslotversiegelung

Die einzelnen Arbeitspakete wurden ausführlich in den fünf Halbjahresberichten beschrieben, sodass im Schlussbericht das Hauptaugenmerk auf die wesentlichen Erfolge und Ergebnisse gelenkt wurden.

Ergebnisse

Die Firma Pröll beschäftigte sich mit der Entwicklung und Optimierung folgender Siebdruckpasten. Am Fraunhofer ISE wurde das spezifische Know-how für die Pastenentwicklung im Labormaßstab erarbeitet sowie die Charakterisierung der mit den Pasten von Pröll hergestellten Schichten vorgenommen. Die Arbeiten beinhalteten ebenfalls die Bestimmung der Siebparameter sowie die Optimierung des Druckvorganges. Für die Pasten wurden folgende spezifische Siebdruckpasten entwickelt :

- 1) Titandioxidpaste, der „Motor“ der Farbstoffsolarzelle, an der der Elektrolyt und Farbstoff zur Stromproduktion gebunden wird;
- 2) Zirkondioxidpaste, die lichtstreuende Schicht zur Gestaltung von Logos/Designs und zur dekorativen Farbgebung;
- 3) Glaslotpaste, zur hermetischen Versiegelung und Gewährleistung der Langzeitstabilität.

Die Platinpaste wird von der Cracow University of Technology geliefert, die Silberpaste wird von der Fa. Ferro bezogen.

In der Wertschöpfungskette von Farbstoffsolarzellen nimmt die Pastenentwicklung eine zentrale Stellung ein (vgl. Abbildung 7). Im Allgemeinen sollten die Pasten folgenden Anforderungen genügen: guter Oberflächenverlauf, d.h. homogene, rissfreie und blasenfreie Schichten, metallfreie Pasten zur Vermeidung von Kriechströmen, strukturviskoses Verhalten (Thixotropie), um hohe Schichtstärken mit guter Kantenschärfe zu erzielen. Weiterhin wird eine lange Sieboffenhaltung gefordert, um eine möglichst hohe Anzahl an Drucken ohne Siebreinigung durchführen zu können. Somit kann die Effizienz des Produktionsprozesses gesteigert und eine höhere Produktivität erzielt werden. Lange Haltbarkeiten und optimale Substratbenetzung, um gute Haftung zur TCO-Oberfläche zu erhalten,

sind unabdingbar, da von Farbstoffsolarzellen in Gebäudefassaden (GIPV, gebäudeintegrierte Photovoltaik) 20 Jahre Garantie gefordert werden.

Zur Qualitätskontrolle und Prüfung der Reproduzierbarkeit wurden folgende Prüfmethode angewandt: Bestimmung der Kornfeinheit (Agglomeratgröße, Körnigkeit) mit Grindometer, Viskosität mit Kegel-Platte-Viskosimeter, Schichtdickenmessung, Beurteilung des Druckbilds (Kantenschärfe, Oberflächenverlauf) sowie Haftung (Gitterschnittprüfung, Klebebandtest, Fingernagelprobe).

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst die Dispergiermethode evaluiert. Zur Auswahl standen die Rührwerkskugelmühle (RWKM, Abbildung 8) und der Dreiwalzenstuhl (3-Walze, Abbildung 9). Vorteile der 3-Walze sind die problemlose Reinigung sowie die Möglichkeit, hochviskose Pasten zu verarbeiten. Mit der Rührwerkskugelmühle können niedrigviskose Farben dispergiert und mit höchster Feinheit hergestellt werden.



Abbildung 8: Rührwerkskugelmühle



Abbildung 9: Dreiwalzenstuhl

Beide Vermahlungsaggregate sind in Keramik- oder Stahlausführung erhältlich. Zumal jedoch im zweiten Fall durch Metallabrieb verunreinigte Pasten produziert wurden, wurde die um ein Vielfaches teure Perlmühle in Keramikausführung zur Produktion der Titandioxid- und Glaslotpaste benutzt. Da die Mahlkugeln, bestehend aus Yttrium stabilisiertem ZrO_2 , dem Härtegrad des Zirkondioxid-Pulvers entspricht, ist eine Nassvermahlung nicht möglich. Stattdessen wurde ultrafeines, nanoskaliges Zirkondioxid mit einem Dissolver (Abbildung 10) homogen dispergiert. Damit wurde der Meilenstein A: Evaluierung der Dispergiermethoden der Siebdruckpasten erreicht.



Abbildung 10. Dissolver

Bei der Optimierung der Druckeigenschaften musste verhindert werden, dass Additive mit den elektrochemischen und katalytischen Eigenschaften der Elektroden wechselwirken.

Das allgemeine Produktionsverfahren zur Herstellung der ColorSol[®]-Pasten ist in Abbildung 11 dargestellt. Zuerst werden die Rohstoffe wie Bindemittel (Harze), Pigmente (Metalloxide), organische Lösemittel und Additive (Dispergiermittel, Stabilisatoren, Benetzungsmittel, Entschäumer, Rheologieadditive etc.) in einem Dissolver vordispergiert. Im Anschluss wird diese Rohpaste (Premix) unter Einhaltung zahlreicher Parameter mit einer Rührwerkskugelmühle vermahlen. Nach Prüfung und Einstellung der Druckviskosität wird die nanoskalige Paste abgefüllt.

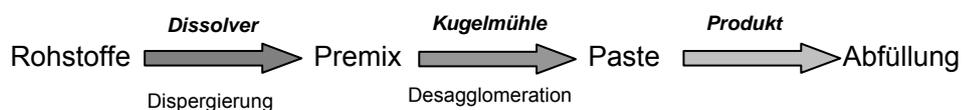
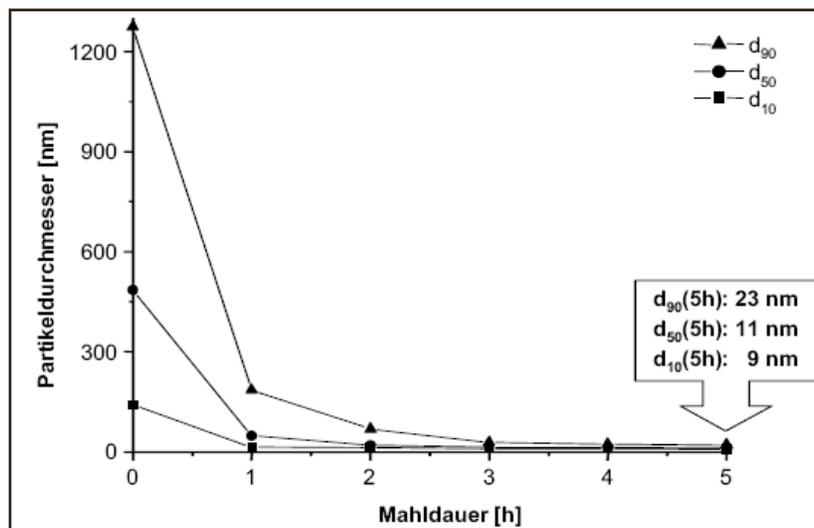


Abbildung 11: Produktion der ColorSol®-Pasten

Damit optimal dispergierte Pasten gefertigt werden können, müssen folgende Parameter aufeinander abgestimmt werden: Dissolver-Scheibenumfang, Drehzahl, Dispergierzeit, Viskosität, Mahlgutmenge, Gefäßgeometrie, Mahlkörpergröße, Mahlkörpermaterial, Mahldauer, Energieeintrag, Passagen- oder Rezirkulationsbetrieb, Trennspalt etc. Die vom Hersteller angegebenen Anatas-Teilchendurchmesser der Sekundärpartikel betragen etwa 1 – 3 µm. Nach dem Vermahlungsprozess beträgt die mittlere Teilchengröße der TiO₂-Partikel 10 – 30 nm (entspricht der Primärteilchengröße) und die Paste erscheint somit transparent.

Der Dispergiergrad, also letztendlich die Feinheit der Paste, beeinflusst maßgeblich die rheologischen Eigenschaften und den Transparenzgrad. In Abbildung 12 ist der TiO₂-Partikeldurchmesser gegen die Mahldauer aufgetragen.



Quelle: Sonderdruck Coating 1-2005, S. Schär, Nassvermahlung und Dispergierung im nanoskaligen Bereich mit Rührwerkskugelmöhlen.

Abbildung 12: Partikeldurchmesser vs. Mahldauer

Die Feinheit der Partikel bzw. der Transparenzgrad spiegelt sich im optischen Verlauf während der Produktion der Titandioxid-Paste wider. Der optische Verlauf ist in Abbildung 2b zu sehen. Mit zunehmender Dispergierzeit verliert die anfangs noch weiß erscheinende Paste ihr Deckvermögen (Opazität). Nach etwa drei Stunden Nassvermahlung im Rezirkulationsbetrieb wird eine transparente,

nanoskalige TiO₂-Paste erhalten. Der Kurvenverlauf in Abbildung 11 korreliert mit dem optischen Verlauf in Abbildung 13.

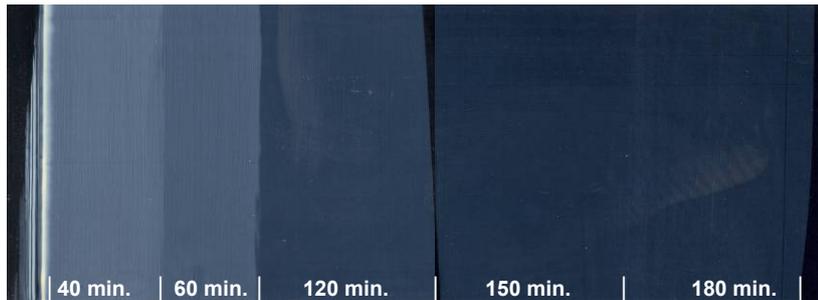
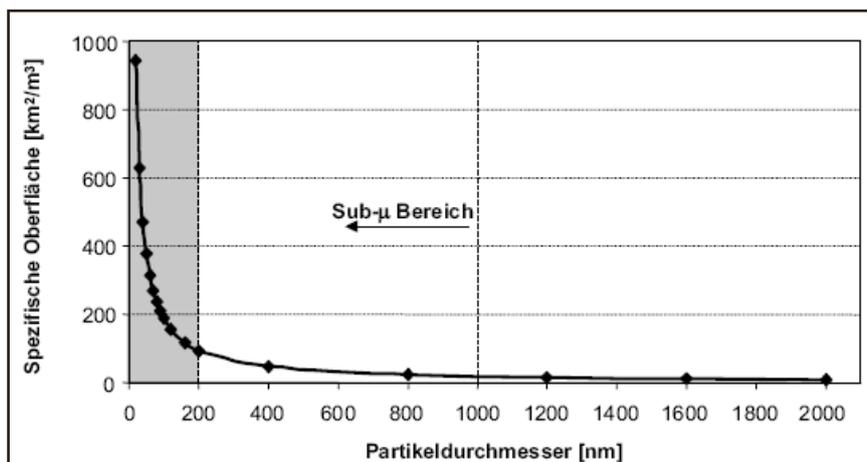


Abbildung 13: Der Transparenzgrad steigt mit zunehmender Desagglomeration

In Abbildung 14 ist der Partikeldurchmesser gegen die volumenbezogene spezifische Oberfläche aufgetragen. Ab einem Partikeldurchmesser von ca. 200 nm steigt die spezifische Oberfläche sprunghaft an (grau markierter Bereich). Mit der überproportional großen Oberfläche nehmen die elektrischen Wechselwirkungen, insbesondere die Van-der-Waals-Kräfte, zwischen den Partikeln stark zu.



Quelle: Sonderdruck Coating 1-2005, S. Schär, Nassvermahlung und Dispergierung im nanoskaligen Bereich mit Rührwerkskugelmühlen.

Abbildung 14: Partikeloberfläche vs. Durchmesser

Dadurch wird Reagglomeration, d. h. die Aggregatbildung zuvor voneinander getrennter Primärpartikel, begünstigt. Zur Vermeidung der Reagglomeration müssen die TiO₂-Nanopartikel elektrisch, sterisch oder elektrosterisch stabilisiert werden. Dies erfolgt durch chemische Oberflächenmodifizierung mit Hilfe von Carbonsäuren oder β -Diketonen, die chemisch an die metalloxidischen Nanopartikel gebunden werden (kovalent oder durch Komplexbildung). Eine vollständige Desagglomeration bis hin zur Primärpartikelgröße wird hiermit ermöglicht. Auf diese Weise sind Pasten mit hohen Festkörpergehalten zugänglich.

Zahlreiche Varianten von Glaslot-, Zirkondioxid- und Titandioxid-Pasten wurden hinsichtlich Druckbarkeit, Kantenverlauf etc. getestet und selektiert. Die Wirkungsgrade weiterer TiO₂-Pastenvarianten werden derzeit am ISE bestimmt. Die besten Druckergebnisse, gute Haftung, Kantenschärfe, metallfreie, blasenfreie und homogene Schichten sowie ein Wirkungsgrad von $\eta = 5,7 \%$ (aktive Fläche) wurden mit der ZrO₂-Paste **L55932**, TiO₂-Paste **L56536** und der Glaslot-Paste **L55643** erhalten. Damit wurde der Meilenstein M: Auswahl der für einsatzfähig getesteten Versionen aus den entwickelten Siebdruckpastenvarianten erreicht, die Aufskalierbarkeit an der Glaslot- und TiO₂-Paste sollte noch überprüft werden. Hierzu erfolgte ein zweitägiger Workshop im Technikum der Bühler AG, Uzwil, Schweiz. Dort konnten jeweils 5 kg Glaslot- und Titandioxid-Paste auf einer Kugelmühle in Keramikausführung hergestellt werden. Trotz der hohen Viskositäten (bis zu 140.000 mPa·s) gelang die Produktion der Druckpasten mit der Kugelmühle. Die Vermahlung auf einer Keramik-Dreiwalze führte nicht zum gewünschten Transparenzgrad.

Wie bereits erwähnt, beeinflusst die Partikeloberfläche die Viskosität und damit die Verlaufseigenschaften der Siebdruckpasten. Die Oberfläche ist vom Teilchendurchmesser abhängig, der wiederum durch den Vermahlungsprozess bestimmt wird. Voraussetzung für guten Oberflächenverlauf und ausreichende Kantenschärfe ist ein optimiertes Fließverhalten der Pasten, das mittels Rotations-Sprungversuch 3ITT (**3-Intervall-Thixotropie-Test**) untersucht werden kann. Die Kurvenverläufe in Abbildung 15 sind in drei Bereiche unterteilt: In Phase I befindet sich die Paste im Ruhezustand. Beim Druckvorgang erfolgt unter starker Scherung ein Strukturabbau und die Paste fließt (innere Struktur zerstört, Phase II). Der Strukturwiederaufbau erfolgt in der Regenerationsphase III.

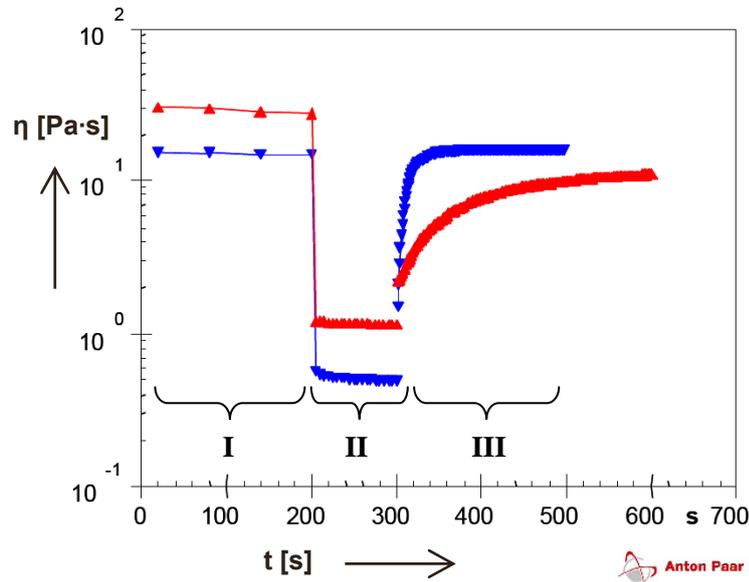


Abbildung 15: Rotations-Sprungversuch 3ITT

Die blaue Kurve (▼) zeigt einen schnellen Wiederaufbau der inneren Pastenstruktur, was im steilen Anstieg in Phase III deutlich wird. Als Resultat zeigt die Paste kein Sagging (= Ablaufneigung), kein Verschmieren und zeichnet sich durch eine gute Kantenschärfe aus. Zudem lassen sich hohe Schichtstärken erzielen. Der schnelle Strukturwiederaufbau hat jedoch einen schlechten Oberflächenverlauf zur Folge (= Levelling). Im Gegensatz hierzu erfolgt der Strukturaufbau der roten Kurve (▲) langsamer, die Paste verfließt besser und zeigt ein gutes Levelling. Nachteilig ist die erhöhte Ablaufneigung mit Tendenz zum Verschmieren, verbunden mit einer geringeren Schichtstärke.

Idealzustand wäre eine Fließfähigkeit bzw. ein Viskositätsverlauf, der zwischen den beiden Kurven eingeschlossen würde. Über die zeitabhängige Viskositätsfunktion wurden Informationen über das viskoelastische Verhalten der Paste zugänglich, die bei der Entwicklung und Optimierung der Pasten berücksichtigt wurden.

Am ISE wurden die Pasten mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Aufnahmen unterschiedlicher TiO₂-Pastenvarianten sind in Abbildung 16 gezeigt. Im Bild links oben ist ein großer Riss sichtbar, der sich durch die komplette, etwa 10 µm dicke TiO₂-Schicht zieht. Abplatzungen durch Haftungsverlust sind die Folge. Das bedeutet Verlust des elektrischen Kontakts der Titandioxidschicht zur TCO-Oberfläche, wodurch die solare Effizienz beeinträchtigt wird. Im linken unteren Bild ist die Rissbildung weitaus geringer und kann nach vorliegenden Erkenntnissen in diesem Maß toleriert werden. Der Idealzustand wird in der

rechten REM-Aufnahme gezeigt, die Ausbildung solcher homogener Strukturen erhöht den Wirkungsgrad der Farbstoffsolarzelle.

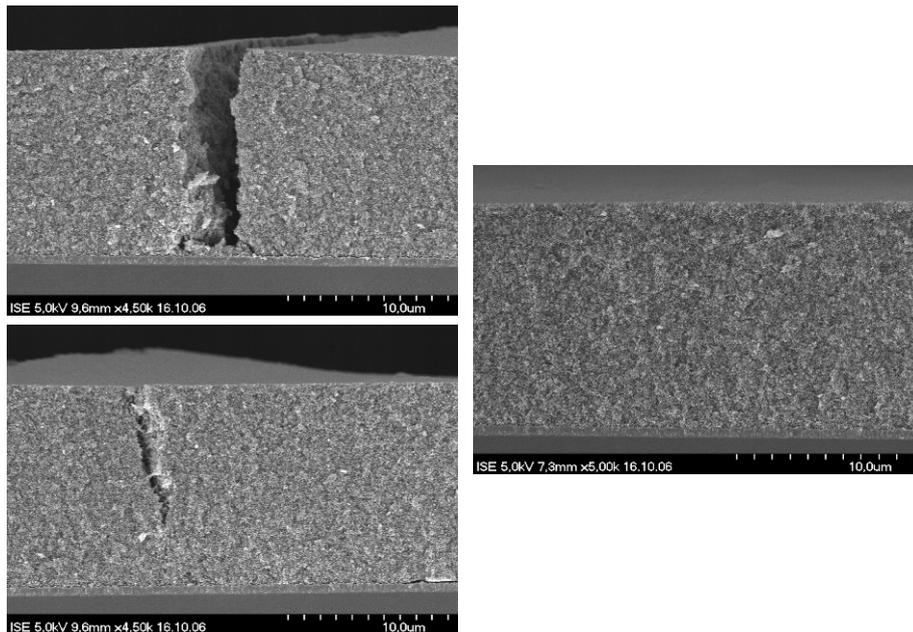


Abbildung 16: REM-Aufnahmen, Fraunhofer-ISE (li.o.: Rissbildung und Ablösung der TiO₂-Schicht von TCO- Oberfläche; li.u.: tolerierbare Rissbildung; re: Idealzustand)

Vom ISE wurde das Ziel verfolgt, mit jeweils nur einem Druck die geforderten Schichtstärken zu erreichen, um so den Aufwand beim Druckprozess zu minimieren. Waren zunächst zeitaufwendige Mehrfachdrucke notwendig, konnte mit den von der Firma Pröll KG empfohlenen und an die Pasten angeglichenen Gewebe mit minimaler Anzahl von Drucken erfolgreich 30 cm x 30 cm Module gedruckt und das Prototypen-Panel gebaut werden. Somit konnte der Druckprozess optimiert werden: Der Verschleiß von Verbrauchsmaterialien (Rakelgummi, Reiniger) wurde reduziert, die Gewebeabnutzung minimiert (Siebe öfters einsetzbar) und Zeit und Energie eingespart, da jeder Druck einen Trocknungsschritt erfordert (z. B. 5 Minuten bei 120-150 °C).

Beim Optimieren der Titandioxidschicht muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen angestrebter maximaler Schichtdicke und der Vermeidung von Trockenrissen aufgrund einer zu hohen Schichtdicke. Trotz der Vorteile eines Einfachdruckes wurde daher am Fraunhofer ISE im letzten Projektjahr beschlossen, zur Verbesserung des Schichtaufbaus ein Mehrfachdruck mit speziellen für den technischen Präzisionsdruck entwickelten Geweben zu testen.

Auf Grund der neuen Empfehlungen der Firma MP+L, die kurz vor Projektende vom Fraunhofer ISE zur Herstellung von Hochpräzisionssieben mit eingebunden wurde, wurden Veränderungen am 100 cm x 60 cm CAD-Moduldesign und Änderungen am Druckprozess vorgenommen.

Um die geforderten Schichtdicken beim Titandioxid zu erzielen, sind jetzt bis zu drei Drucke mit MP+L-Sieben notwendig. Der zuletzt bei der Firma BGT Bischoff durchgeführte Druckworkshop zeigte ein mögliches Problem von Mehrfachdrucken: Nicht vollständig entfernte organische Lösemittel aus Schicht 1 können die 2. Schicht angreifen und es kommt zur Kocherbildung oder Kratern etc., was eine inhomogene Oberfläche zur Folge haben kann. Falls nicht passgenau gedruckt wird, wird mit jedem weiteren (ungenauen) Druck das gesamte Druckbild bzw. die Passgenauigkeit beeinträchtigt.

In weiteren Untersuchungen ist daher ein Vergleich der MP+L-Gewebe mit denen von Pröll erarbeiteten Gewebedaten nötig um eine Reproduzierbarkeit als Grundlage für eine Qualitätskontrolle zu ermöglichen.

Die Firma Pröll KG konnte erfolgreich eine Glaslotpaste, eine nanoskalige Titandioxidpaste und Zirkondioxidpaste reproduzierbar herstellen und das Up-Scaling vom Labor- zum Kilogramm-Maßstab demonstrieren. Hierzu konnten erfolgreich industrielle Methoden aus dem nano-skaligen Dispergiervorgang angewandt werden. Die Pasten sind mindestens 12 Monate haltbar. Weitere Angaben zur Mindesthaltbarkeit sind nach Ablauf der insgesamt vier Jahre dauernden Gebindehaltbarkeitsprüfung zu erwarten.

Damit ist das Arbeitspaket 4, die Entwicklung von Druckpasten für die Herstellung von Farbstoffsolarzellen, erfolgreich abgeschlossen (Abbildung 17).



Abbildung 17: ColorSol-Pasten in 1 Liter-Gebinden (v.l.n.r.: Glaslot-, TiO_2 -, ZrO_2 -Paste)

2.3 Arbeitspaket 5: Entwicklung und Optimierung des Herstellungsverfahrens von Elektrolyten

Ziel

Ziel des Projektes war die Entwicklung und Optimierung des Herstellungsverfahrens von Elektrolyten für Farbstoffsolarzellen.

Vorgehensweise

Zur Bearbeitung dieses Arbeitspakets wurde durch das Fraunhofer ISE ein Unterauftrag an die Firma IoLiTec vergeben. Deren Aufgaben gliederten sich in die folgenden Teilarbeitspakete:

AP 5.5.1: Auswahl und Identifizierung geeigneter ionischer Flüssigkeiten

AP 5.5.2: Etablierung geeigneter Synthese- und Analysemethoden

AP 5.5.3: Überführung der Technologie in den Pilot-Maßstab

AP 5.5.4: Toxikologische Untersuchung für ausgewählte ionische Flüssigkeiten

AP 5.5.5: Studie zur kombinierten Anwendung der Technologie der Farbstoffsolarzelle für autarke Sensoren für die Umwelttechnik

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sind in den Zwischenberichten ausführlich beschrieben und werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

Ergebnisse

AP 5.5.1: Auswahl und Identifizierung geeigneter ionischer Flüssigkeiten

Eine von IoLiTec zu Beginn des Projektes durchgeführte umfangreiche Literaturrecherche mit dem Ziel, Systematiken und Trends bei der Zusammensetzung von Elektrolyten und Zusammenhänge mit der Performance aufzuzeigen, kam zu dem Ergebnis, dass selbst führende Forschungsgruppen auf dem Gebiet der Farbstoffsolarzellen eine systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung leistungsfähiger Elektrolyte vermissen lassen. Im Rahmen zweier Arbeitstreffen mit dem Fraunhofer ISE wurden daher Elektrolytzusammensetzungen ausgewählt, die in der Literatur eine gute Performance gezeigt hatten, um durch systematische Variationen dieser Elektrolyte Einblicke in die Wirkungsweisen der Additive zu erhalten. Als Basis für die Elektrolyte wurden die zwei folgenden ionische Flüssigkeiten ausgewählt:

- 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate (EMIM SCN)
- 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide (PMIM I)

Als mögliche Additive sollten die folgenden Substanzen zum Einsatz kommen:

- Iod
- Guanidinium thiocyanate
- *N*-Methylbenzimidazole
- Acetonitril, höhere Homologe von Acetonitril und Alkoxy-substituierte Homologe von Acetonitril

Die Literaturrecherche, die zu Beginn des Projektes durchgeführt wurde, konnte durch kontinuierliche Recherchen auf dem neuesten Stand gehalten werden. Im Rahmen dieser Recherchen wurde ein weiterer Elektrolyt identifiziert, der sich aus den folgenden Komponenten zusammensetzt:

- 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide (PMIM I)
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium triflate (EMIM OTf)
- Iod
- *N*-Butylbenzimidazol
- Guanidinium thiocyanat

Während Additive wie Iod, Guanidinium thiocyanat, Acetonitril und *N*-Methylbenzimidazol kommerziell erhältlich sind, wurden sowohl die ionischen Flüssigkeiten, als auch das für den letzten Elektrolyten benötigte *N*-Butylbenzimidazol von IoLiTec hergestellt (AP 5.5.2).

Darüber hinaus wurden im Rahmen der weiterführenden Literaturrecherche weitere Substanzen identifiziert, die als geeignete Basiskomponenten für Elektrolyte in zahlreichen Publikationen eingesetzt wurden:

- 1-Hexyl-3-methylimidazolium iodide (HMIM I)
- 1,2-Dimethyl-3-propylimidazolium iodide (PDiMIM I)
- 1-Butyl-1-methylpyrrolidinium iodide (BMPyrr I)

Insbesondere HMIM I und PDiMIM I zeichneten sich in den Literaturangaben durch eine hohe Stabilität aus.

Eine Aufstellung über die Rechercheergebnisse wurde dem Konsortium zu Beginn des Projektes zur Verfügung gestellt.

AP 5.5.2: Etablierung geeigneter Synthese- und Analysemethoden

Synthese ionischer Flüssigkeiten

Die Herstellung ionischer Flüssigkeiten für den Einsatz in Farbstoffsolarzellen unterscheidet sich nicht grundlegend von der Synthese ionischer Flüssigkeiten für andere Anwendungen und erfolgte in der Regel einstufig (Iodide, Triflate) bzw. zweistufig (Thiocyanate, Triflate).

Im einstufigen Reaktionsverlauf erfolgte die Synthese der entsprechenden Iodide oder Triflate durch Umsetzung einesamins mit einem Alkyljodid bzw. Methyltriflat (

Abbildung 18, am Beispiel von PMIM I und EMIM OTf).

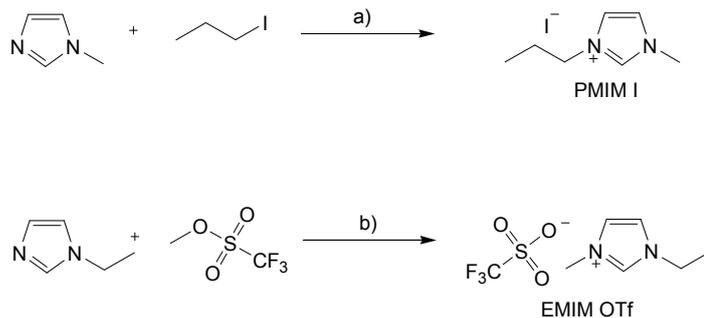
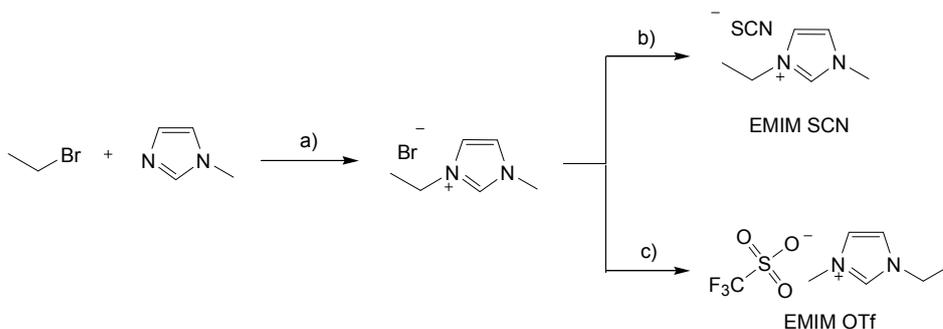


Abbildung 18: Einstufige Synthese von PMIM I (oben) und EMIM OTf (unten);
a) THF, 50°C, 24h, b) 0°C, 2h

Bei der zweistufigen Synthese ionischer Flüssigkeiten wurde im ersten Reaktionsschritt durch Alkylierung von Methylimidazol ein entsprechendes Imidazolium halogenid hergestellt, das im zweiten Reaktionsschritt einer Anionenmetathese zum Imidazolium Thiocyanat oder Triflate umgesetzt wurde (Abbildung 19).



**Abbildung 19: Zweistufige Synthese von EMIM SCN und EMIM OTf;
a) Acetonitril, Raumtemp., 24h, b) NH₄SCN, CH₂Cl₂, 24h, c) MeOTf, 20°C**

Ziel des Projektes war es unter anderem die Synthese ionischer Flüssigkeiten hinsichtlich der Reinheit der hergestellten Substanzen zu optimieren. Hierzu war es erforderlich die vorhandene Analytik an die neuen Spezifikationen anzupassen und die Synthesen dieser Substanzen hinsichtlich eines möglichen Optimierungsbedarfs zu prüfen. Dabei war ein weiterer entscheidender Punkt, der vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen wirtschaftlichen Betrachtung der Produktion von Farbstoffsolarzellen eine wichtige Rolle spielte, die Entwicklung einer atomökonomischen Synthesemethode.

Analytik Ionischer Flüssigkeiten

Ionenchromatographie

Da die Herstellung hochreiner ionischer Flüssigkeiten bei der Entwicklung von Elektrolyten für den Einsatz in Farbstoffsolarzellen von entscheidender Bedeutung ist, war es im Rahmen des Projektes von großer Wichtigkeit, geeignete analytische Verfahren zu entwickeln oder bestehende Methoden auf die entsprechende Problemstellung zu adaptieren. Aufgrund langjähriger Erfahrungen in der Analytik von und mit ionischen Flüssigkeiten konnte hierbei auf einige bereits etablierte Methoden zurückgegriffen werden. Der Schwerpunkt der Qualitätskontrolle bei den Einstufigen Reaktionen lag dabei auf der Detektion nicht umgesetzten Amins, da dieses nur äußerst aufwändig aus der fertigen ionischen Flüssigkeit zu entfernen ist. Als universellste Methode wurde hierfür die Kationen-Chromatographie identifiziert, da diese neben einer breiten Anzahl von klassischen Metallionen und typische Kationen ionischer Flüssigkeiten auch in der Lage ist nicht umgesetztes Amin zu detektieren, wenn die zu analysierende Probe in der Probenvorbereitung angesäuert und das Amin somit zum Ammonium-Salz protoniert wird.

In Abbildung 20 sind einem typischen Chromatogramm aus der Reaktionskontrolle einer PMIM I-Synthese die Chromatogramme von reinem Methylimidazol und reinem PMIM I gegenübergestellt.

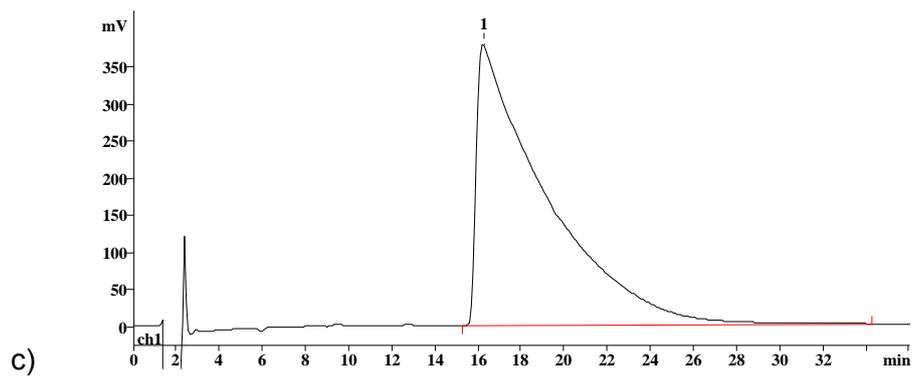
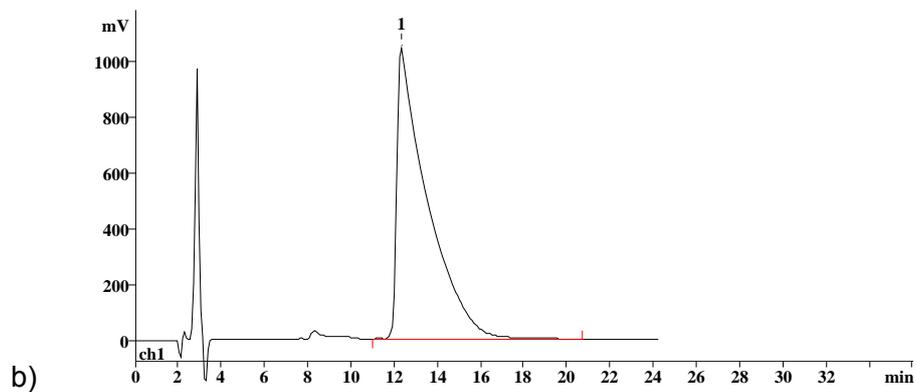
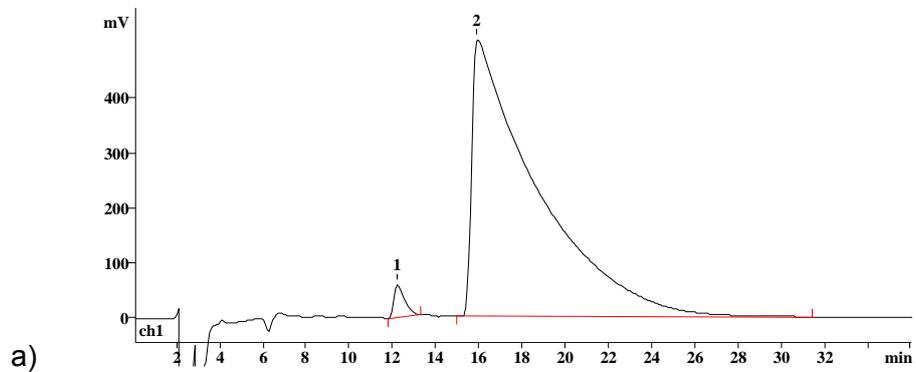


Abbildung 20: Kationen-Chromatogramme von a) Reaktionsmischung, b) reinem Methylimidazole und c) reinem PMIM I

Es ist deutlich zu erkennen, dass in Abbildung 20a) neben dem fertigen Produkt noch Reste nicht umgesetzten Methylimidazols vorhanden sind, während diese nach längerer Reaktionszeit vollständig abreagiert sind (Abbildung 20c). Es konnte

gezeigt werden, dass die hier eingesetzte Methode für alle Amine eingesetzt werden kann, während sich insbesondere nicht-UV-aktive Amine der klassischen HPLC mit UV-Detektor entziehen und somit nicht nachweisbar sind. Im Laufe des Projektes wurden die Synthesen der Iodide durch geeignete Wahl der Reaktionsbedingungen (Temperatur, Lösungsmittel, Reaktionszeit) so optimiert, dass der Gehalt an nicht umgesetzten Amin im fertigen Produkt <100 ppm betrug und somit den selbst gestellten Anforderungen an die Reinheit der Substanzen entsprach.

In analoger Weise wurde auch bei der Analytik zweistufiger Synthesen ionischer Flüssigkeiten vorgegangen, wobei hier das Hauptaugenmerk auf der vollständigen Entfernung von Halogenid-Verunreinigungen im zweiten Reaktionsschritt lag. Abgesehen von Iodid stellen Halogenid-Anionen insofern ein Problem dar, dass sie einen Einfluß auf das Iodid-Triiodid-Redoxpaar haben können und nicht gewünschte Interhalogenidanionen (I_2Cl^- oder I_2Br^-) bilden können. Als universellste Analysemethode bietet sich in diesen Fall die Anionen-Chromatographie an, da diese für Standardanionen wie Chlorid und Bromid eine Nachweisgrenze von einigen wenigen ppm besitzt. In Kombination mit einem Silbernitrat-Test auf Halogenide kann ein Halogenid-Gehalt von <50 ppm garantiert werden. In Abbildung 21 sind die Chromatogramme für eine zweistufige EMIM OTf-Synthese, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurde, dem einer einstufigen Synthese gegenübergestellt.

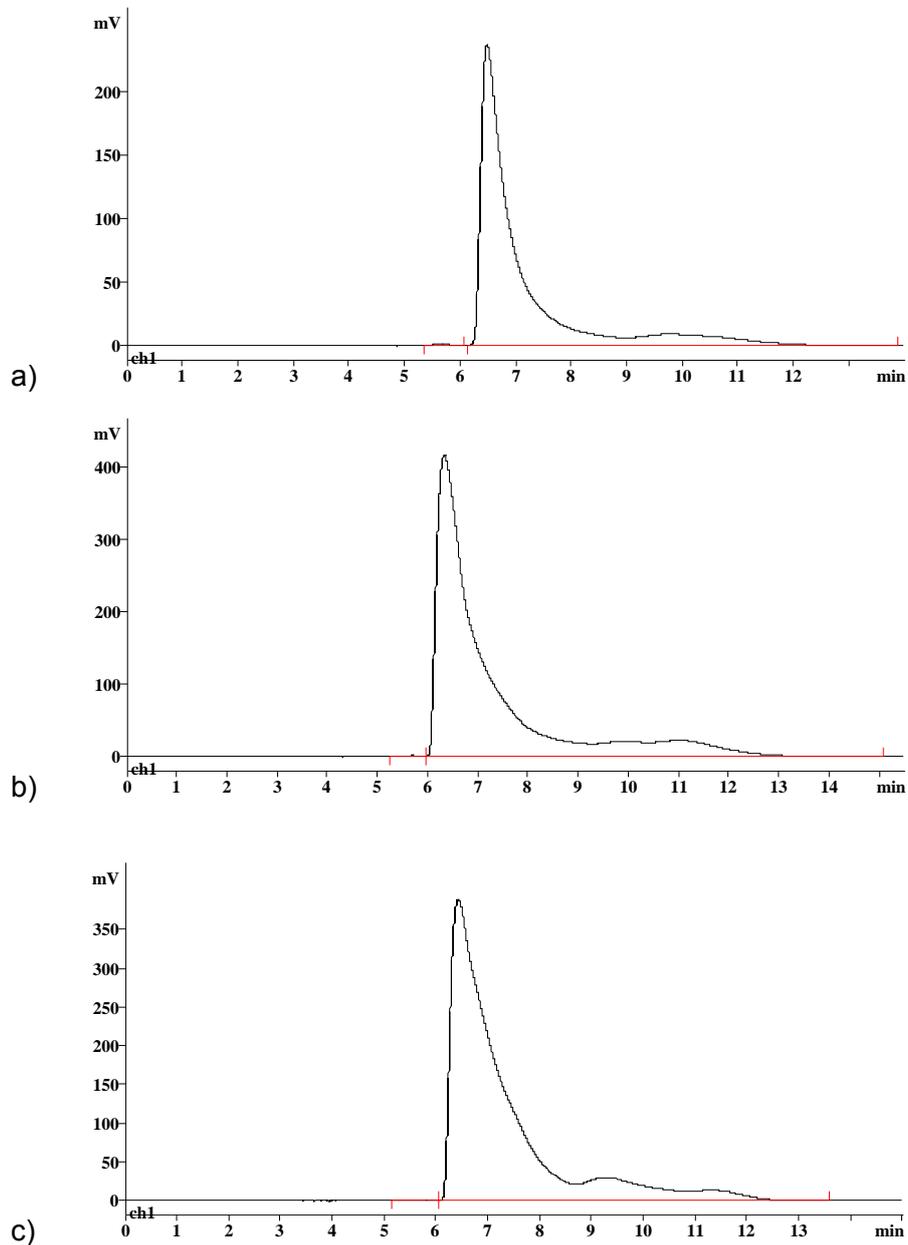


Abbildung 21: Chromatogramme zweistufige EMIM OTf Synthese; a) zweistufige Synthese (0.27% Halogenid), b) zweistufige Synthese (<250 ppm Halogenid), c) einstufige Synthese (<100ppm Halogenid)

Aus den Chromatogrammen in Abbildung 21 ist ersichtlich, dass die einstufige Synthese von EMIM OTf deutlich höhere Reinheiten liefert, als die zweistufige

Syntheseführung, was darauf zurückzuführen ist, dass in der einstufigen Synthese per se keine Halogenide vorkommen können. Nichtsdestotrotz bietet auch die zweistufige Reaktionsführung Vorteile, da aufgrund eines zwischenzeitlichen Kristallisationsschritts Amine wesentlich besser entfernt werden können. Je nach Anforderungen an die ionische Flüssigkeit kann also zwischen den beiden Reaktionsmöglichkeiten gewählt werden. Insbesondere vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Synthese ist der einstufige Reaktionsweg zu bevorzugen, da in diesem Fall äußerst atomökonomisch gearbeitet wird und der Einsatz von leicht flüchtigen organischen Lösungsmitteln vermieden werden kann.

Keine Wahlmöglichkeit bezüglich des Synthesewegs besteht hingegen bei der Synthese von EMIM SCN, da dieses nicht in einer einstufigen Reaktionsführung hergestellt werden kann. Die Synthese erfolgte in diesem Fall zweistufig, wobei im zweiten Syntheseschritt der Austausch eines Halogenidanions gegen das Thiocyanat-Anion erfolgte. Die Synthese wurde durch Rühren einer äquimolaren Mischung von EMIM Br und $\text{NH}_4 \text{SCN}$ in verschiedenen organischen Lösungsmitteln durchgeführt. Als das am besten geeignete Lösungsmittel stellte sich hierbei Dichlormethan heraus. In einer optimierten Synthese wurde das Produkt nach 24 Stunden Reaktionszeit bei Raumtemperatur nach Filtration und Verdampfen des Lösungsmittels im Vakuum in zunächst 98.9% Reinheit isoliert. Nach Trocknung des Produktes im Vakuum und erneutem Lösen in absolutem Dichlormethan wurde der ausgefallene Feststoff erneut abfiltriert und das Lösungsmittel entfernt. Das Produkt wurde in 97% Ausbeute und in einer Reinheit von 99.87% erhalten. Die Anionen-Chromatogramme dieser optimierten Synthese sind in Abbildung 22 wiedergegeben.

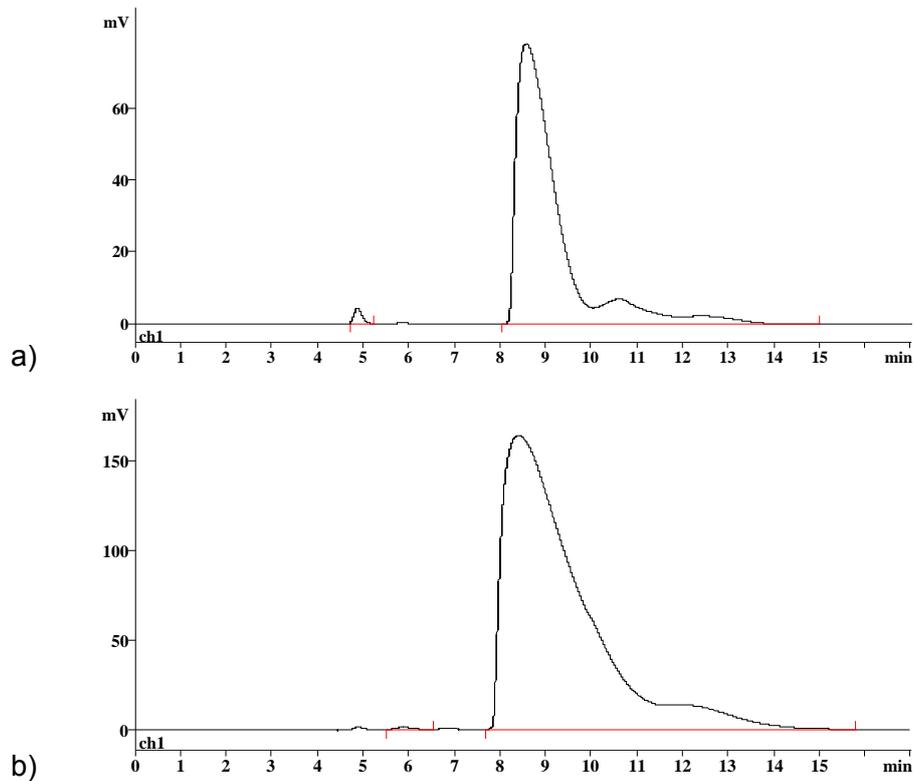


Abbildung 22: Chromatogramme zweistufige EMIM SCN Synthese; a) 1.1 % Bromid, b) 0.13% Bromid

Der zusätzliche Filtrationsschritt in der Synthese von EMIM SCN ist nötig, da eine Kreuzlöslichkeit zwischen dem Produkt und NH_4Br auftritt. Letzteres muss also noch umständlich aus dem Produkt entfernt werden. Da dieser Schritt die Handhabung eines leicht verdampfenden organischen Lösungsmittels beinhaltet, stellt er eine Emissionsquelle für dieses Lösungsmittel dar. Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Synthese muss überlegt werden, ob der Einsatz von EMIM SCN in DSSC sinnvoll ist, sofern keine alternativen Synthesewege vorhanden sind.

Cyclovoltammetrie

Zusätzlich zu den obigen Analysemethoden wurden alle produzierten ionischen Flüssigkeiten einer elektrochemischen Analyse mittels Cyclovoltammetrie (CV) unterzogen. Diese Methode eignet sich unter anderem dazu nichtionische Verunreinigungen, die mittels Ionenchromatographie nicht detektierbar sind zu analysieren, da diese gegebenenfalls durch elektrochemische Oxidations-

und/oder Reduktionsreaktionen detektiert werden können. Des Weiteren kann mit dieser Methode die (elektro-)chemische Stabilität der ionischen Flüssigkeit ermittelt werden. In der Regel sind elektrochemisch stabile ionische Flüssigkeiten auch thermisch relativ stabil. Beispiel-CVs von reinem PMIM I, HMIM I und EMIM OTf sind im Abbildung 23 gegeben.

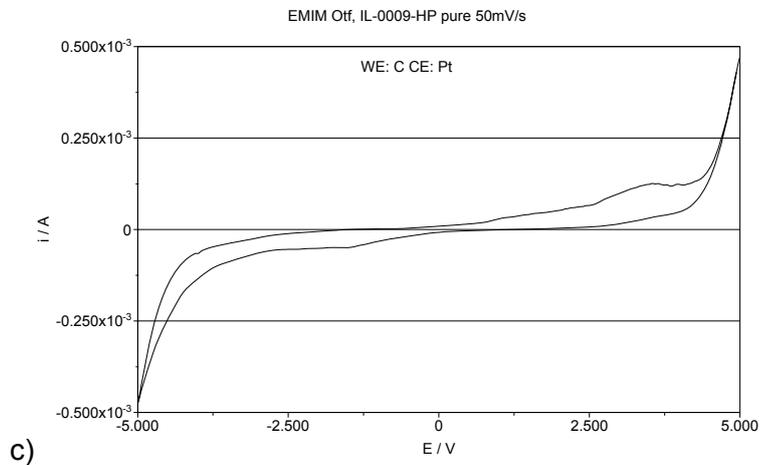
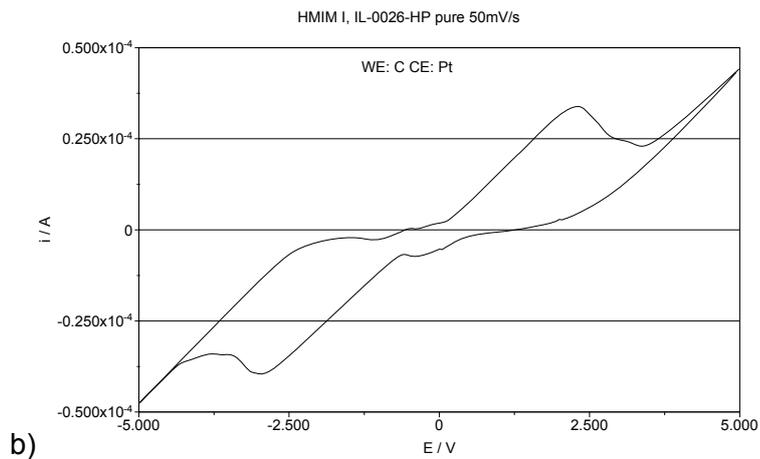
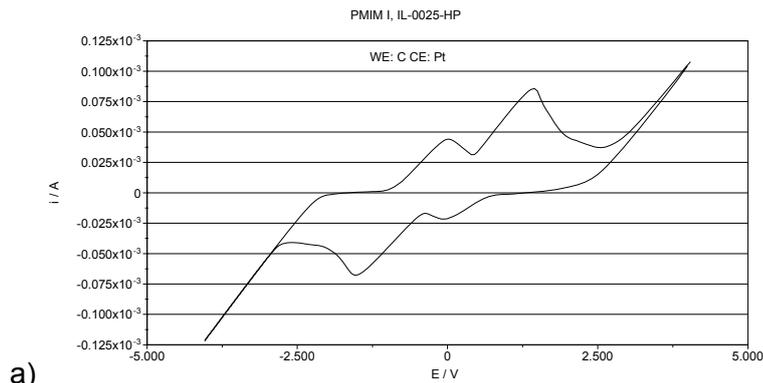


Abbildung 23: Cyclovoltamogramme ionischer Flüssigkeiten a) PMIM I, b) HMIM I und c) EMIM OTf (Scanrate 50 mV/s, T =25 °C)

Sowohl das CV von PMIM I als auch das von HMIM I zeigen die für Iodide typischen Oxidations- und Reduktionspeaks. Während beim PMIM I jedoch 2 Oxidationspotentiale und 2 Reduktionspotentiale beobachtet wurden, konnte beim HMIM I nur jeweils ein Potential beobachtet werden. Die deutliche Verschiebung der Potentiale im Falle des HMIM I kann mit der deutlich höheren Viskosität dieser Substanz und einer dadurch hervorgerufenen diffusionskontrollierten Reaktion erklärt werden. Erwartungsgemäß weist das CV von EMIM OTf keine ausgeprägten Oxidations- und Reduktionspotentiale auf, was darauf beruht, dass das Triflat-Anion gegen Redox-Prozesse stabil ist. Kleinere Signale auf der Oxidations- und Reduktionsseite des CV lassen jedoch darauf schließen, dass die Substanz nicht vollständig getrocknet und eventuell noch Spuren von Verunreinigungen enthält.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 5.5.2. wurden verschiedene ionische Flüssigkeiten synthetisiert und auf ihre Reinheit hin analysiert, wobei sowohl die Synthesemethoden als auch die Analytik optimiert wurden. Die so hergestellten ionischen Flüssigkeiten wurden im weiteren Projektverlauf für die Herstellung diverser Elektrolyte eingesetzt.

Herstellung von Elektrolyten

Die Herstellung von Elektrolyten erfolgte in enger Abstimmung mit dem Fraunhofer ISE. Alle Elektrolyte wurden bei IoLiTec aus den selbst hergestellten ionischen Flüssigkeiten und kommerziell erhältlichen Additiven und Lösungsmitteln gemischt. Alle kommerziellen Produkte wurden ohne weitere Reinigung eingesetzt. Eine Übersicht über die hergestellten Elektrolyte gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Elektrolytzusammensetzungen

Nr.	Basis-IL	V	Anteil V	Ansatzgröße	Mischung BE	Ansatzgröße	Zugabe	Zugabe	Zugabe	Zugabe	
FE			[Massen-%]	BE [g]		FE [mL]	l2 [g]	NMBI [g]	GTC [g]		
1	PMIM-I	***	0	31,20	31,20 g	PMIM-I und 0,00 g	***	20,00	0,254	1,322	0,236
2	PMIM-I	MeCN	10	32,00	28,80 g	PMIM-I und 3,20 g	MeCN	20,00	0,254	1,322	0,236
3	PMIM-I	MeCN	20	32,00	25,60 g	PMIM-I und 6,40 g	MeCN	20,00	0,254	1,322	0,236
4	PMIM-I	MeCN	30	25,00	17,50 g	PMIM-I und 7,50 g	MeCN	20,00	0,254	1,322	0,236
5	PMIM-I	H2O	1	32,00	31,68 g	PMIM-I und 0,32 g	H2O	19,00	0,241	1,256	0,225
6	PMIM-I	H2O	2,5	32,00	31,20 g	PMIM-I und 0,80 g	H2O	19,00	0,241	1,256	0,225
7	PMIM-I	H2O	5	32,00	30,40 g	PMIM-I und 1,60 g	H2O	19,00	0,241	1,256	0,225
8	PMIM-I	EMIM-BF4	60	40,00	16,00 g	PMIM-I und 24,00 g	EMIM-BF4	20,00	0,254	1,322	0,236
9	PMIM-I	EMIM-BF4	80	40,00	8,00 g	PMIM-I und 32,00 g	EMIM-BF4	20,00	0,254	1,322	0,236
14	PMIM-I	MeCN	10	32,00	28,80 g	PMIM-I und 3,20 g	MeCN	20,00	0,254	2,643	0,236
15	PMIM-I	H2O	5	32,00	30,40 g	PMIM-I und 1,60 g	H2O	20,00	0,254	2,643	0,236
16	PMIM-I	***	0	32,00	32,00 g	PMIM-I und 0,00 g	***	20,00	0,254	1,322	0,000
17	PMIM-I	MeCN	10	32,00	28,80 g	PMIM-I und 3,20 g	MeCN	20,00	0,254	1,322	0,000
18	PMIM-I	H2O	5	32,00	30,40 g	PMIM-I und 1,60 g	H2O	20,00	0,254	1,322	0,000
19	PMIM-I	EMIM-SCN	10	32,00	28,80 g	PMIM-I und 3,20 g	EMIM-SCN	20,00	0,254	1,322	0,236
20	PMIM-I	EMIM-SCN	20	32,00	25,60 g	PMIM-I und 6,40 g	EMIM-SCN	20,00	0,254	1,322	0,236
21	PMIM-I	EMIM-SCN	30	32,00	22,40 g	PMIM-I und 9,60 g	EMIM-SCN	20,00	0,254	1,322	0,236
22	PMIM-I	MeCN	10	65,00	58,50 g	PMIM-I und 6,50 g	MeCN	43,00	0,546	0,000	0,000
23	PMIM-I	MeCN	20	65,00	52,00 g	PMIM-I und 13,00 g	MeCN	45,00	0,571	0,000	0,000
24	PMIM-I	MeCN	10	65,00	58,50 g	PMIM-I und 6,50 g	MeCN	10,00	0,127	0,000	0,118
25	PMIM-I	MeCN	20	65,00	52,00 g	PMIM-I und 13,00 g	MeCN	10,00	0,127	0,000	0,118

FE: Fertigelektrolyt, V: Verdünner, BE: Basiselektrolyt, NMBI: N-Methylbenzimidazol, GTC: Guanidiniumthiocyanat

Alle gemischten Elektrolyte wurden dem Fraunhofer ISE für weiterführende Tests zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse dieser Tests werden an anderer Stelle vorgestellt und diskutiert.

AP 5.5.3: Überführung der Technologie in den Pilot-Maßstab

Bei der Überführung der Produktionstechnologie in den Pilotmaßstab konzentrierte IoLiTec sich zum einen auf ein Up-Scaling der Iodid-Synthese am Beispiel des PMIM I und zum anderen auf ein Up-Scaling der Elektrolyt-Mischung.

Die Herstellung der Iodide im Labormaßstab erfolgte in allen Fällen als Batch-Synthese. Diese Vorgehensweise hat jedoch im größeren Maßstab den Nachteil, dass die Temperaturregelung der Reaktion auf Grund eines schlechten Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen nur schwer durchführen lässt, was über den Reaktionsverlauf zu unerwünschten Temperaturspitzen und somit zu extremen Verfärbungen des Produktes führen kann. Um dieses Problem zu umgehen wurde bei IoLiTec im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes NEMESIS ein kontinuierliches Produktionsverfahren auf Basis von mikrostrukturierten Bauelementen zur Herstellung ionischer Flüssigkeiten entwickelt. In dem kontinuierlichen System kann durch ein wesentlich größeres Verhältnis von Oberfläche zu Volumen gezielter Wärme zu- und abgeführt werden, so dass eine Verfärbung der Produkte weitestgehend vermieden werden kann. Diese Technologie sollte jetzt dafür eingesetzt werden, die für die Basiselektrolyte benötigten Iodide in größeren Mengen zu produzieren. Um die Anlage auf die neuen Produkte auslegen zu können, wurden bei IoLiTec zunächst Kinetiken für die Synthese von PMIM I (Abbildung 18) bestimmt. Die Umsatz-Zeit-Verläufe sind in Abbildung 24 wiedergegeben.

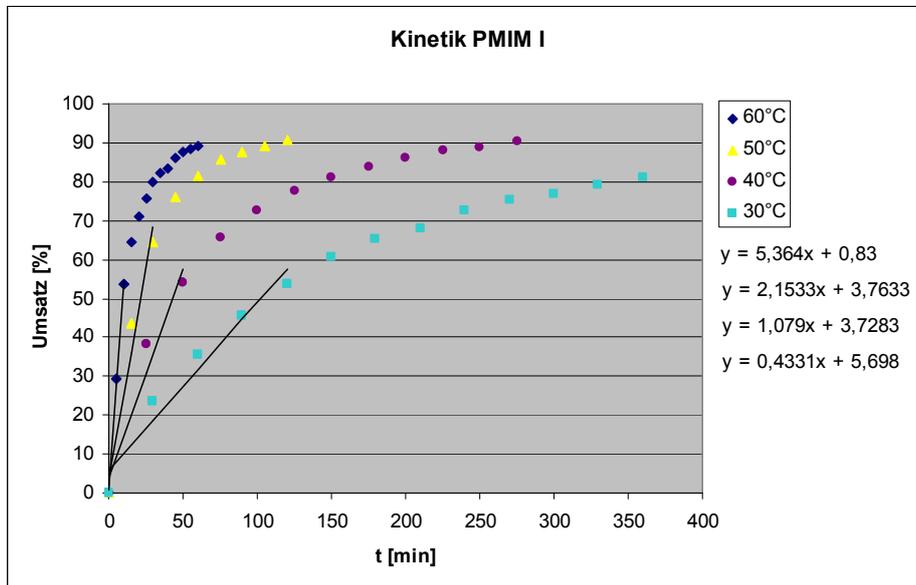


Abbildung 24: Umsatz-Zeit-Verläufe der PMIM I-Synthese bei verschiedenen Temperaturen

Aus den so ermittelten Daten konnte die Aktivierungsenergie der Reaktion zu 69.1 kJ/(mol·K) bestimmt werden. Die Auslegung einer ersten Testanlage für die Synthese ist in Abbildung 25 wiedergegeben.



Abbildung 25: kontinuierlicher Reaktor für die Synthese von PMIM I

Die Übertragung von der Batch-Synthese auf die kontinuierliche Synthese gelang problemlos wie Tabelle 5 zu entnehmen ist.

Tabelle 5: kontinuierliche PMIM I-Synthese

Experiment Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Vges [ml/min]	8	8	8	8	8	9	9	10	16,5	
VMelm [ml/min]	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05	3,5	3,5	4	6,5	
VI-Pr [ml/min]	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	5,5	5,5	6	10	
Mischer	T-Mischer									
Rkt-tube 1	D [mm]	2	2	2	2	2	2	2	2	
	T [°C]	80	85	90	90	95	95	100	100	
Rkt-tube 2	Mischer	x	x	x	x	x	x	x	x	
	D [mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	
	T [°C]	80	85	90	90	95	95	100	100	
Rkt-tube 3	Mischer	x	x	x	x	x	x	x	x	
	D [mm]	4	4	4	4	4	4	4	4	
	T [°C]	80	85	90	90	95	95	100	100	
Rkt-tube 4	Mischer	x	x	x	x	x	x	x	x	
	D [mm]	5	5	5	/	/	/	/	/	
	T [°C]	80	85	90	/	/	/	/	/	
Rkt-tube 5	Mischer	x	x	x	x	x	x	x	x	
	D [mm]	6	6	6	/	/	/	/	/	
	T [°C]	80	85	90	/	/	/	/	/	
Rkt-tube 6	Mischer	x	x	x	x	x	x	x	x	
	D [mm]	7	7	7	/	/	/	/	/	
	T [°C]	80	85	90	/	/	/	/	/	
Umsatz		86%	96%	99%	96%	98%	98%	99%	99%	96%

Hohe Umsätze von 99% bezogen auf Methylimidazol wurden bei relativ hohen Temperaturen und kurzen Verweilzeiten erzielt. Die Entfernung des nicht umgesetzten Methylimidazols erfolgte anschließend durch Waschen des Produktes mit einem organischen Lösungsmittel. Nach Kationen-Chromatographie wurde der Restamingehalt des gereinigten Produktes in allen Fälle zu <100 ppm ermittelt.

Das so erhaltene PMIM I wurde für die Herstellung verschiedener Elektrolytmischungen, die am Fraunhofer ISE getestet wurden eingesetzt. Die Aufskalierung der Herstellung der Elektrolyte bereitete keine Probleme. Lediglich die Zeit, die für die Herstellung größerer Mengen zu veranschlagen ist erhöhte sich, da die Additive sich zunehmend langsamer im Basiselektrolyten lösten.

AP 5.5.4: Toxikologische Untersuchung für ausgewählte ionische Flüssigkeiten

Die Abstimmung über den in der Toxikologischen Studie einzusetzenden Elektrolyte erfolgte zwischen den Partnern IoLiTec und Fraunhofer ISE. Der ausgewählte Elektrolyt hatte sich in ähnlicher Form in der Literatur bereits als äußerst langzeitstabil herausgestellt und setzte sich aus dem folgenden Komponenten zusammen:

- 1-Methyl-3-propylimidazolium iodid,
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium triflat,
- N-Butylbenzimidazol,
- Iod,
- Guanidinium thiocyanat.

Sowohl die Einzelkomponenten als auch der Fertigelektrolyt wurden der Fa. Campus Technologies GmbH, Freiburg, für die Tests zur Verfügung gestellt. Ein Muster des Fertigelektrolyten wurde für weitergehende Tests dem Fraunhofer ISE überlassen.

Die Ergebnisse des Tests werden in Arbeitspaket 2 (siehe Kapitel 1.2) vorgestellt und diskutiert.

AP 5.5.5: Studie zur kombinierten Anwendung der Technologie der Farbstoffsolarzelle für autarke Sensoren für die Umwelttechnik

Ein Teilaspekt des Projektes war schließlich die Erstellung einer Studie zur kombinierten Anwendung der verwendeten Technologien im Bereich der Sensor-Technologie. Der Grundgedanke hierbei war es, die spezifischen Eigenschaften ionischer Flüssigkeiten zu nutzen, und diese durch Verwendung eines druckbaren Schwamms zu immobilisieren. Insbesondere die Möglichkeit, einen nanostrukturierten Schwamm auf ein Substrat aufzudrucken war ein wichtiges Arbeitspaket der Firma Pröll im ColorSol-Projekt, während sich IoLiTec bereits mit dem Einsatz ionischer Flüssigkeiten in Sensoren auseinander gesetzt hat. Die Ergebnisse der Studie zur kombinierten Anwendung dieser Technologien wurde im Rahmen des Projektes erstellt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Fazit und Ausblick zu Arbeitspaket 5

Im Rahmen des Arbeitspaket 5 konnten verschiedene Elektrolyte im Hinblick auf die verschiedenen Anforderungen in einer Farbstoffsolarzelle betrachtet werden. Neben den rein technischen Anforderungen wurden die eingesetzten Elektrolyte

auch toxikologisch und ökotoxikologisch untersucht (vgl. AP2). Begleitend wurde eine Studie zum Einsatz der Technologie in Sensoren durchgeführt.

Im Hinblick auf die allgemein hohen technischen Anforderungen ist es nicht gelungen, grundsätzlich neue, verbesserte Typen von Elektrolyten zu entwickeln. Dies sollte Gegenstand weiterer, mehr grundlagenorientierten Projekten sein und wird in unterschiedlichen Kooperationen kontinuierlich jenseits des abgeschlossenen Projektes ColorSol weiterverfolgt. Gleichwohl ist es aber gelungen, die bisherigen Synthesewege durch neue, effizientere Methoden zu ersetzen. Begleitend wurden zudem neue, noch nicht bekannt gewesene Analysemethoden entwickelt. Die wiederum hieraus gewonnenen Erkenntnisse waren darüber hinaus wichtig, eine Übertragung die kontinuierliche Synthese basierend auf der Mikroverfahrenstechnologie vornehmen zu können. Dieser für die Skalierung und damit schlussendlich auch für die Kommerzialisierung wichtige Meilenstein wurde durch die Synergie zum parallel bearbeiteten, ebenfalls vom BMBF geförderten Projekt NEMESIS ermöglicht und auch erfolgreich abgeschlossen. Somit ist die Bereitstellung größerer Mengen (durch die Fa. IoLiTec) im Hinblick auf eine erfolgreiche Vermarktung möglich.

Eine Studie zum Einsatz von Teilen der Farbstoffsolarzellen-Technologie in autarken Sensoren zeigte schließlich, dass in einem interdisziplinären Ansatz Erkenntnisse auf andere Anwendungsgebiete ausgeweitet werden könnten. Dies muss zukünftig allerdings durch experimentelle Studien im Rahmen von weiteren Projekten unterlegt werden.

2.4 Arbeitspaket 6: Entwicklung eines ressourceneffizienten Produktionsverfahrens für Farbstoffsolarzellen

Ziel

Ziel war bei der Entwicklung eines ressourceneffizienten Produktionsverfahren für Farbstoffsolarzellen die einzelnen Produktionsschritte zu untersuchen, weitestgehend standardisierte Produktionsverfahren der Glasindustrie und der Siebdrucktechnik zur Anwendung zu bringen und diese bezüglich des Produkts Farbstoffsolarzelle zu optimieren. Hierbei sollten, in enger Zusammenarbeit von BGT Bischoff Glastechnik, Fraunhofer ISE und Fraunhofer IAO, die Parameter vom Labor in reale Produktionsverhältnisse übertragen werden, sowie die Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit erreicht werden. Ein weiteres Ziel war die Aufskalierung von Modulen, die mit einer Größe von 30 cm x 30 cm im Labor des Fraunhofer ISE schon gefertigt wurden, auf die Größe 60 cm x 100 cm.

Vorgehensweise

Innerhalb der Fa. BGT Bischoff Glastechnik wurde eine Projektgruppe gebildet, um sicherzustellen, dass die notwendigen Personal- und Sachmittel zur Verfügung gestellt werden und dass die Kommunikation innerhalb der Firma BGT bezüglich des Forschungsprojekts ColorSol gewährleistet ist.

In zahlreichen Arbeitstreffen, Projekttreffen und Workshops wurden die Arbeiten mit den Projektpartnern festgelegt und abgestimmt. Dabei wurden Ablaufpläne erstellt und die konkreten Prozessschritte definiert. Dies bedeutete für BGT, die einzelnen Herstellungsschritte zu untersuchen, um optimale und effiziente Parameter für die Produktion zu finden.

Im Folgenden sind Herstellungsschritte im Einzelnen aufgelistet:

- Zuschnitt des Glases und Kantenbearbeitung,
- Einbringen der Bohrungen für die spätere Befüllung,
- Reinigung der beschichteten Gläser,
- Strukturierung der TCO-Beschichtung,
- Bedrucken der Gläser mit den verschiedenen Pasten im Siebdruckverfahren,
- Sintern und Fusen,
- Laminieren
- Einfärben, Befüllen mit Elektrolyt, und Versiegeln der Einfüllöffnungen,
- Kontaktieren und Einbau in ein Rahmensystem.

Ergebnisse

Zuschnitt des Glases und Kantenbearbeitung:

Die TCO-beschichteten Gläser wurden nach der Beschaffung zunächst mit branchenüblichen Zuschnittsanlagen auf das benötigte Maß zugeschnitten. Dann wurden die Kanten bearbeitet, hierbei gibt es verschiedene Kantenqualitäten (gesäumt, geschliffen oder poliert). Dies geschieht ebenfalls auf Standard-Schleifanlagen. Diese Standard-Verfahren sind sehr effizient und können kaum noch optimiert werden.



Abbildung 26: Zuschnitt des Glases

Einbringen der Bohrungen für die spätere Befüllung:

Die Bohrungen konnten auf Grund des kleinen Durchmessers von ca. 1,5 mm nicht mit üblichen Bohranlagen, wie sie bei BGT vorhanden sind, eingebracht werden. Das Fraunhofer ISE ließ die Bohrungen bislang für die ersten Versuchsgläser, die im Labor gefertigt wurden, direkt nach dem Strukturieren der TCO-Schicht mittels Laser einbringen. Es musste also für das Forschungsprojekt eine Alternative gesucht werden, da das Bohren mit Laser bei einer Fremdfirma sehr zeit- und kostenintensiv ist. Während des Forschungsprojekts wurde bei BGT auf eine vorhandene Wasserstrahlschneideanlage zurückgegriffen, die mit einem sehr dünnen Wasserstrahl und mit hohem Druck die Bohrungen in die Scheibe einbringen kann. Bei einer Serienproduktion wird man Bohranlagen bzw. Laser verwenden, mit denen man Bohrungen mit so kleinen Durchmessern herstellen kann.



Abbildung 27: Einbringen der Löcher mit Wasserstrahl

Reinigung der beschichteten Gläser:

Standardmäßig sind bei den meisten Arbeitsgängen in der Glasindustrie wie z.B. Kantenbearbeitung, Laminieren, Isolierglasfertigung..., den jeweiligen Anlagen Waschmaschinen vor- bzw. nachgeschaltet, in denen die Gläser mit entmineralisiertem Wasser und Waschbürsten gereinigt und anschließend getrocknet werden. Also ebenfalls ein standardisiertes Verfahren, das hier angewendet werden kann. Allerdings muss die Qualität des Waschwassers ständig kontrolliert werden und man muss auf die Auswahl der Waschbürsten achten, damit keine Rückstände auf der TCO-Beschichtung zurückbleiben, da dies den Wirkungsgrad negativ beeinflussen kann.

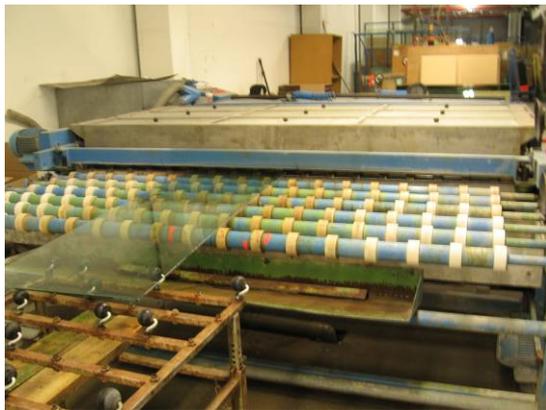


Abbildung 28: Reinigung der beschichteten Gläser

Strukturierung der TCO-Beschichtung:

Die Strukturierung der TCO-Beschichtung wird mittels Laser vorgenommen. Hier ist sehr wichtig, dass man für die Gläser die gleichen Anschlagpunkte in der Maschine hat, wie später beim Siebdruck, damit die Toleranzen minimiert werden. Es wurden auch kostengünstigere Alternativen der Strukturierung mittels Sandstrahlung getestet. Die ersten Versuche wurden mit einer dünnen Edelstahlmaske durchgeführt. Diese Versuche haben nicht zum gewünschten Ergebnis geführt, da die Edelstahlmaske nicht plan blieb, sondern sich nach kurzer Zeit stark wölbte. Es wurden weitere Versuche gemacht mit einer Maskierpaste, die mittels Siebdruck aufgedruckt wurde und nach der Sandstrahlung wieder abgewaschen werden konnte. Hier gab es teilweise positive Ergebnisse, allerdings liegt hier noch erhebliches Optimierungspotential bezüglich der Genauigkeit, der Kantenschärfe und verschiedener punktförmiger Fehlstellen. Dies wurde dann aus Zeitgründen nicht weiter verfolgt.

Bedrucken der Gläser mit den verschiedenen Pasten:

Bei der Herstellung der Farbstoffsolarzelle spielt der Siebdruck eine tragende Rolle. Siebdruck und Siebherstellung sind Standardverfahren in der Glasindustrie, die bei BGT sehr erfolgreich angewendet werden.

Zur Produktion der FSZ werden verschiedene Pasten mit verschiedenen Layouts gedruckt. Dies bedeutet, dass für jede Paste ein geeignetes Siebgewebe gefunden werden musste, um die erforderlichen Schichtdicken und Kantenschärfen zu erreichen und die Aufskalierung von 30 cm x 30 cm auf 60 cm x 100 cm zu ermöglichen. Bei der Auswahl der Siebgewebe musste auf das Material des Gewebes, auf die Maschenweite und die Fadendurchmesser geachtet werden. Es wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und der Firma Pröll verschiedene Siebgewebe getestet. Ebenso mussten die Parameter am Drucktisch optimiert werden. Raketstellung, Form und Material der verwendeten Rakel, Absprung spielen beim Drucken der verschiedenen Pasten eine große Rolle.

Ebenso musste bei der Entwicklung der Pasten, die von der Firma Pröll durchgeführt wurde, auf verschiedene Parameter geachtet werden, wie Viskosität, Druckbarkeit usw. Die Parameter am Drucktisch müssen immer wieder neu eingestellt werden, da die Pasten bei unterschiedlichen klimatischen Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit eine unterschiedliche Viskosität besitzen und das Auswirkungen auf die Druckbarkeit und somit auf das Druckbild haben kann. Es wurden mehrere Druckworkshops bei BGT zusammen mit dem Fraunhofer ISE und der Firma Pröll veranstaltet, bei denen, bezüglich Siebgewebe, Einstellungen am Drucktisch, Verhalten der Pasten beim Drucken, viel gelernt wurde.

Während des Forschungsprojekts wurde bei BGT auf einem sogenannten halbautomatischen Drucktisch gedruckt. Es wurden Dreipunktanschlüge konzipiert und verwendet um die verschiedenen Druckgänge mit möglichst geringen Toleranzen nacheinander ausführen zu können. Aufgrund der Layouts mit sehr dünnen Linien ist die Minimierung der Toleranzen sehr wichtig, auch damit die aktive Fläche des späteren Moduls so groß wie möglich ist.

Beim Aufdrucken der verschiedenen Pasten mit den verschiedenen Layouts wird der erste Druck mit der Silberleitpaste ausgeführt. Die Silberleitpaste ist eine kommerziell erhältliche Paste, für die bei BGT auch schon Erfahrungen vorlagen.



Abbildung 29: Druck der Silberleitpaste

Der zweite Druck wird mit der Titandioxid-Paste, die von der Firma Pröll entwickelt wurde, durchgeführt. In der Titandioxid-Paste lagert sich beim späteren Einfärbevorgang der Farbstoff ein, der die charakteristische rötliche bis bernsteinfarbene Erscheinung der Farbstoffsolarzelle erzeugt.

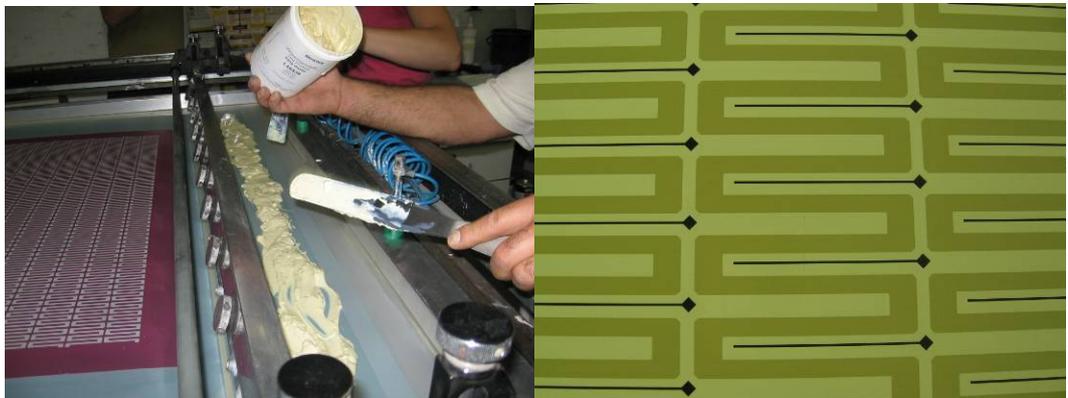


Abbildung 30: Druck der Titandioxid-Paste

Auf der Gegenseite wird dann als dritte Paste die Platinpaste aufgedruckt, die von einem Institut in Polen geliefert wurde. Die nanokolloidale Platinpaste wird auf der Rückelektrode im gleichen Layout wie die Titandioxid-Paste gedruckt.



Abbildung 31: Druck der Platinpaste

Auf Front- und Rückseite werden dann die Glaslotstege aufgedruckt. Diese Glaslotstege versiegeln die einzelnen Zellen auf dem Modul. Diese Versiegelung hat die Aufgabe, den Durchtritt des Elektrolyten von Zelle zu Zelle bzw. nach außen zu verhindern. Ebenso wie die Titandioxid-Paste wurde diese Paste vom Fraunhofer ISE im Labormaßstab entwickelt und von der Firma Pröll aufskaliert und hergestellt.

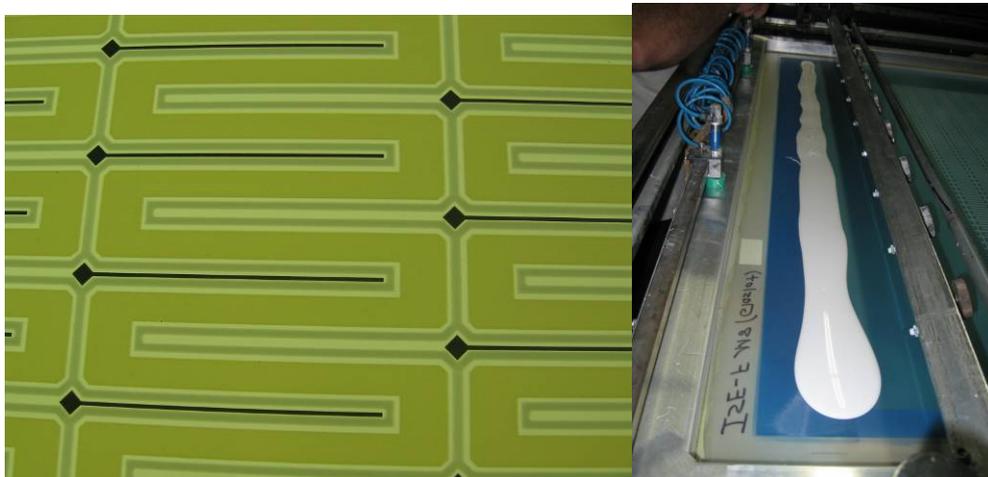


Abbildung 32: Druck der Glaslotpaste

Sintern und Fusen:

Nach dem Drucken werden die Gläser gesintert, damit die restliche Organik aus den Pasten entweicht. Dies geschieht in einem Fusingofen. Für das Sintern wurde

versucht, die Parameter vom Labor des Fraunhofer ISE auf den Ofen bei BGT zu übertragen.

Anschließend werden die gesinterten Gläser gefust. Dabei werden Vorder- und Rückscheibe des Moduls aufeinander positioniert und mit bestimmten Temperaturprofilen „aufeinandergeschmolzen“ (gefust), so dass einzelne versiegelte Zellen entstehen mit einem definierten Abstand der Gläser, welcher später befüllt wird. Das Sintern und Fusen funktioniert bei den 30 cm x 30 cm Modulen, bei den aufskalierten Modulen 60 cm x 100 cm konnten die Temperaturprofile noch nicht abschließend definiert werden.

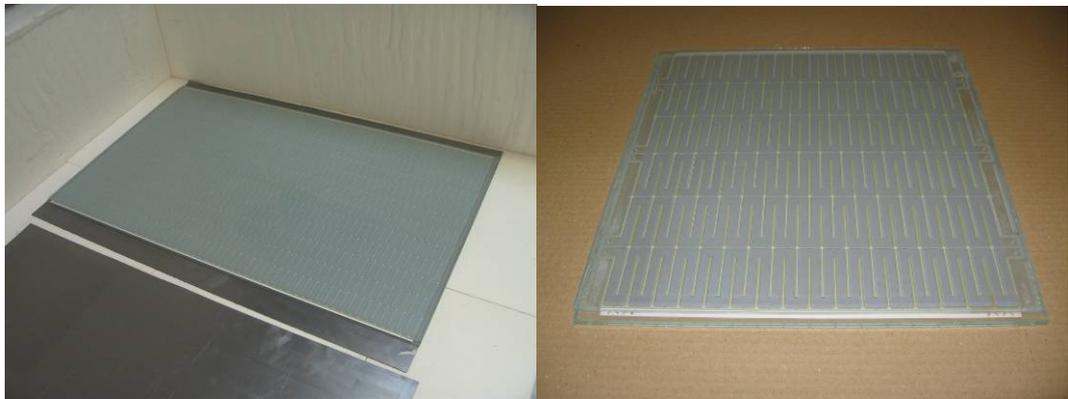


Abbildung 33: Gefustes, noch unbefülltes Farbstoffsolarzellen-Modul

Laminieren:

Da je nach Anwendung z.B. im Überkopfbereich Verbundsicherheitsglas (VSG) vorgeschrieben ist, muss auf ein gefustes Modul eine weitere Scheibe mit PVB-Folie auflaminiert werden. Die Standardanlagen, die in der Glasindustrie zur Herstellung von VSG verwendet werden, können auch hier eingesetzt werden. Laminierungsversuche an gefusteten Modulen haben das gezeigt.

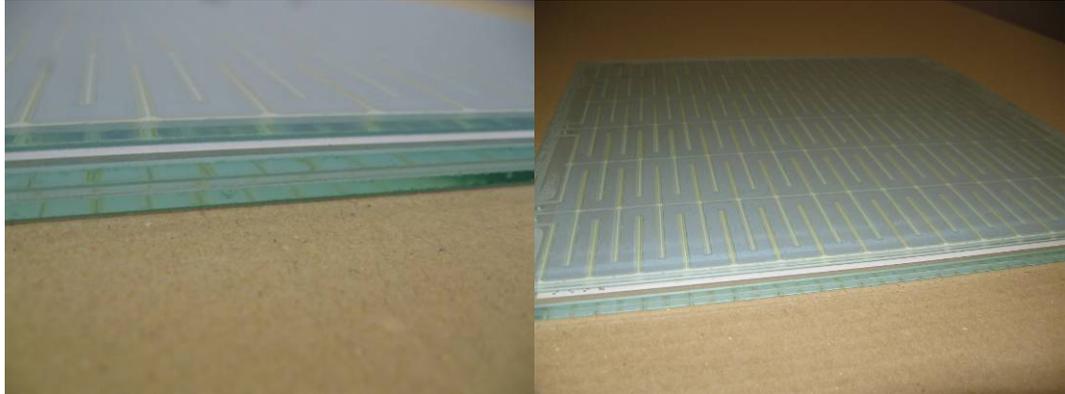


Abbildung 34: Lamiertes, noch unbefülltes Farbstoffsolarzellen-Modul

Einfärben, Befüllen mit Elektrolyt und Versiegeln der Einfüllöffnungen:

Die entstandenen Einzelzellen des Moduls werden dann mit einer, von Fraunhofer ISE und IAO, neu konzipierten Befüllmaschine zuerst mit Farbstoff auf Ruthenium-Basis eingefärbt und danach mit Elektrolyt befüllt, der in diesem Forschungsprojekt von der Firma Iolitec entwickelt wurde. Nach der Befüllung werden die Befüllöffnungen mit UV-aushärtendem Kleber verschlossen. (Fraunhofer ISE).

Resultate der Aufskalierung von komplett gefertigten 60 cm x 100 cm Prototypen

Aus den Siebdruckworkshops bei BGT entstanden eine Reihe von Front- und Rückelektroden, die am Fraunhofer ISE gesintert und gefust wurden. Der Ergebnis der Versuche zeigt, dass auch auf der Modulgröße von 60 cm x 100 cm eine thermische Versiegelung und die anschließende Befüllung mit Farbstoff und Elektrolyt möglich ist (s. Abbildung 35).

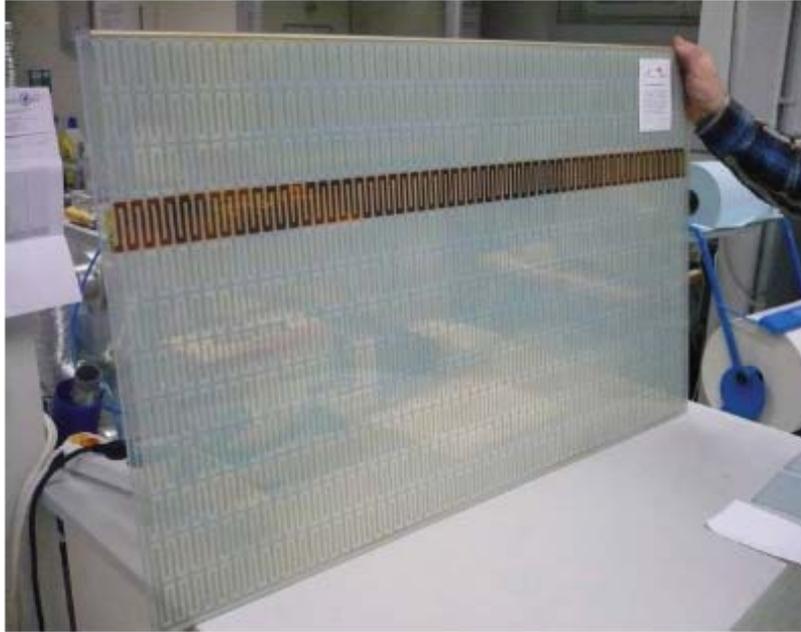


Abbildung 35: Photo eines gefesteten 60 cm x 100 cm Farbstoffsolarmoduls mit eingefärbter und Elektrolyt befüllter Zelle

Befüllmaschine

Zur Aufskalierung der im Labor des Fraunhofer ISE getesteten Verfahren zur Befüllung und Versiegelung von Farbstoffsolarmodulen wurde eine Befüllmaschine entwickelt.

Die einzelnen Verfahren können nur dann effektiv und effizient durchgeführt werden, wenn sie automatisiert bzw. teil-automatisiert durchgeführt werden.

Grundsätzlich sind dabei folgende Verfahrensschritte abzuarbeiten:

- Reinigen der Zellen mit Ethanol,
- Befüllen der Zellen mit Farbstoff,
- Reinigen der Zellen,
- Füllen der Zellen mit Elektrolyt,
- Reinigen der Schläuche,
- Versiegeln der Zellen.

In intensiven Diskussionen mit den Werkstätten an Fraunhofer ISE und IAO hat sich gezeigt, dass zum Aufbau der Maschine Spezial-Know How für Konstruktion und Automatisierungstechnik erforderlich ist, daher wurden für diese Zwecke zwei Unterauftragnehmer, Dr. Piotr Putyra, Kraków, und Knapp Datentechnik, Sindelfingen, eingebunden.

Zu Beginn wurden von Dr. Putyra verschiedene Konzepte für die Befüllmaschine entworfen und diskutiert. Nach Auswahl eines Konzeptes mit Fraunhofer ISE und Fraunhofer IAO wurde diese in AutoCAD unter Auswahl und Einbindung von Standardkomponenten aus der Profil- und Verbindungstechnik, Automatisierungstechnik und Schlauch- und Ventiltechnik konstruiert. Für benötigte Spezialkomponenten wurden ebenfalls Konstruktionszeichnungen erstellt. Weiterhin wurde von Knapp Datentechnik ein steuerungstechnisches Anlagenkonzept entworfen, das die Umsetzung von Steuerungshardware und –software umfasst.

Schließlich wurde das erstellte Konzept umgesetzt und eine entsprechende Maschine gebaut. Die Herstellung einzelner Teile, Aufbau und Gesamtintegration des Maschinenprototypen erfolgten in der Werkstatt des Fraunhofer IAO unter intensiver Einbindung des Fraunhofer ISE. Die erstellte Maschine ist ein industrienaher Prototyp und erlaubt die automatische Befüllung von Farbstoffsolarmodulen der Größe 60 cm x 100 cm mit Farbstoff und Elektrolyt. Eine Option für die automatisierte Versiegelung der Einfülllöcher ist vorgesehen, weiterhin sind einzelne Aspekte für eine Prüf- und Prozesskontrolle bereits integriert. Die Maschine ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 36: Maschine zur automatisierten Befüllung von Farbstoffsolarmodulen während des Aufbaus in der Werkstatt des Fraunhofer IAO

2.5 Arbeitspaket 7: Entwicklung von Anwendungsfeldern für Farbstoffsolarzellen

Ziel des Arbeitspakets 7 war es, Anwendungsfelder für Farbstoffsolarzellen zu identifizieren, Nutzeranforderungen an die Technik und zukünftige Produkte zu spezifizieren und Marktpotentiale zu ermitteln. Zudem sollten Vermarktungsstrategien sowie Absatzmärkte durch die Zusammenarbeit mit Pilotkunden entwickelt und somit Vermarktungsstrukturen aufgebaut werden.

Die Inhalte von Arbeitspaket 7 wurden in Kooperation der Partner Engcotec, Borderstep, Fraunhofer IAO sowie Fraunhofer ISE bearbeitet und unterteilen sich in die im Folgenden beschriebenen sieben Teil-Arbeitspakete.

AP 7.1 Projektstart

Zu Beginn des Vorhabens wurde durch Engcotec, Borderstep, Fraunhofer IAO, Fraunhofer ISE sowie die beteiligten Unternehmen eine Projektgruppe eingerichtet, die basierend auf dem geplanten Arbeitsprogramm eine detaillierte Planung vornahm. Zudem wurden Regeln für die Kommunikation definiert, welche die Zusammenarbeit zwischen den Partnern über den Projektverlauf erleichtern sollten. Die Projektplanung wurde im Verlauf des Vorhabens in Abhängigkeit der technischen Entwicklungen in den Arbeitspaketen 4-6 sowie den Ergebnissen aus

der Kooperation mit trendführenden Nutzern fortlaufend aktualisiert und angepasst.

AP 7.2 Ist- und Trendanalyse für das Innovationsfeld Photovoltaik, Leitbildentwicklung für Farbstoffsolarzellen

In Kooperation mit dem Borderstep Institut hat Engcotec insbesondere durch die Erfassung von technischen Entwicklungen, Kundenanforderungen sowie politischen und marktlichen Rahmenbedingungen der Photovoltaik zur Ist- und Trendanalyse beigetragen. Dazu wurden in Kooperation mit dem Borderstep Institut Marktüberblicke und Technologieprognosen ausgewertet und auf Grundlage von strukturierten Interviewleitfäden Gespräche mit Experten und trendführenden Nutzern aus dem Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik durchgeführt. Die Interviews wurden gleichzeitig genutzt, um trendführende Nutzer für die Teilnahme an einem Lead-User-Workshop und die Entwicklung von Anwendungsideen im folgenden AP 7.3 zu identifizieren.

Basierend auf den Ergebnissen aus der Ist- und Trendanalyse wurde in Kooperation mit den Projektpartnern ein Leitbild für Entwicklung von Farbstoffsolarzellenanwendungen im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik formuliert, das im Rahmen eines Projekttreffens vorgestellt wurde und das in die Ausformulierung der Produkt-Roadmap des Marktszenarios 2010 (siehe AP 1.4) eingeflossen ist.

Die Kernergebnisse der Teilstudie „Farbstoffsolarzelle – Perspektive 2020“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Photovoltaikmarkt entwickelt sich weltweit mit großen Zuwachsraten. In dem sich ausdifferenzierenden Markt konkurriert mittlerweile eine Vielzahl von Technologien miteinander, die auf jeweils spezifische Anwendungsfelder wie z.B. den Einsatz in Kraftwerken, Gebäuden oder auch in der netzunabhängigen Stromversorgung angepasst sind. Neben dem Wirkungsgrad spielen dabei auch die Kosten und die Leistung unter realen Einsatzbedingungen eine wichtige Rolle.
- Die Marktpotenziale der Photovoltaik und insbesondere der gebäudeintegrierten Photovoltaik verdeutlichen den hohen Bedarf an neuen, konkurrenzfähigen PV-Technologien, die hinsichtlich der Kosten, und der gestalterischen Optionen (Farbe, Transparenz, etc.) in bestehende Bauwerke und Stile integriert werden können. Hierfür bieten neue Dünnschichttechnologien und insbesondere Farbstoffssolarzellen ein großes Potenzial.
- Hochwertige Farbstoffssolarzellen für die Anwendung in der Fassade, wie sie im Forschungsvorhaben ColorSol angestrebt werden, zielen damit auf das Marktsegment gebäudeintegrierter, langlebiger Fassadenanwendungen ab.

Kurzlebige, folienbasierte Alternativen stellen daher zunächst keine unmittelbare Konkurrenz dar.

- Auch bei konservativer Abschätzung des Marktpotenzials könnte mit der erfolgreichen Entwicklung einer Farbstoffsolarzellenanwendung für die Gebäudeintegration ein Marktsegment erschlossen werden, das einen Einstieg in eine Kleinserienproduktion rechtfertigen würde. Dies zeigen die eigenen Abschätzungen.

Das Marktszenario 2010 für eine fiktive Firma FSZ Solutions GmbH stellt sich folgendermaßen dar:

- „Im Jahr 2010 bringt die FSZ Solutions GmbH als weltweit erster Anbieter multifunktionale Fassadenelemente mit integrierten Farbstoffsolarzellen an den Markt. Diese hochwertigen Fassadenelemente werden kundenindividuell im Manufaktur-Betrieb gefertigt und können daher in unterschiedlichen Größen geliefert werden. Die Module sind zunächst ausschließlich für Fassaden konzipiert (keine Überkopfverglasung) und können sowohl in Kalt- als auch in Warmfassaden eingesetzt werden. Die Elemente werden mit marktgängigen Montagesystemen geliefert. Muster und Transparenzgrade der Module können vom Kunden individuell festgelegt werden (vom X – Y %). Das verfügbare Farbspektrum der Farbstoffsolarzellen ist in den ersten beiden Jahren nach Markteintritt auf eine Farbe begrenzt ist, wobei durch zusätzliches Bedrucken der Glasaußenflächen kundenindividuelle Farbeffekte erzielt werden können. Die Preis beläuft sich je nach Ausführung auf 500 bis 2.000 €/qm.“
- „Im ersten Jahr nach Markteintritt verkauft die FSZ Solutions GmbH multifunktionale Fassadenelemente für 10 Bauvorhaben in Deutschland, Italien, Frankreich und Spanien. Die produzierte und verkaufte Fläche beträgt dabei 5.000 m². Die verkaufte Modulfläche steigert sich in den drei Folgejahren auf 10.000 m², 20.000 bzw. 30.000 m².“
- „Die (fiktive Firma) FSZ Solutions GmbH wurde im Jahr 2008 gegründet und hat seither die FSZ-Fassadenelemente zusammen mit Forschungspartnern und Partner in der Wertschöpfungskette bis zur Marktreife entwickelt, für die Zertifizierung und Zulassung gesorgt und hat seither die Vermarktung und den Vertrieb übernommen. Bei der Herstellung wird mit den Firmen Pröll (Pasten) IoLiTec (Electrolyte) und Bischoff Glastechnik (Herstellung im Manufakturbetrieb) zusammengearbeitet.“

AP 7.3: Entwicklung von Anwendungsideen mit trendführenden Nutzern

Zunächst wurden generelle Anwendungsideen für Farbstoffsolarzellen erstellt und zusammengetragen. Dies basierte auf Desk Research, Gesprächen mit

Projektpartnern und Anwendern, Messebesuchen und einer durch das Fraunhofer IAO betreute Designstudie (vgl. folgende Abbildung)



Abbildung 37: Beispiele für Anwendungsideen für Farbstoffsolarzellen aus einer durchgeführten Designstudie

Die im Rahmen des vorangegangenen Arbeitspaketes identifizierten trendführenden Nutzer wurden nach Kompetenzen strukturiert und in einer zweiten Runde um weitere Kontakte ergänzt. Ziel war, eine möglichst umfassende Abdeckung von führenden Experten aus dem Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik sowie der Fassaden- und Gebäudeplanung zu erreichen.

Mit den erfassten Experten wurde am 10. Oktober 2007 in Stuttgart ein Lead-User-Workshop durchgeführt, in dem folgende Inhalte behandelt wurden:

- Vorstellung eines parallel im Rahmen von AP 7.6 (siehe unten) entwickelten Prototypen von Farbstoffsolarzellen in einer Fassadenanwendung,
- Erfassung und Bewertung zentraler Anforderungen an zukünftige Farbstoffsolarzellenprodukte für die gebäudeintegrierte Photovoltaik,
- Weiterentwicklung von Anwendungsideen (Dachliegefenster, Fassadenelement und Photovoltaikverglasungen) von Farbstoffsolarzellen in der gebäudeintegrierten Photovoltaik, Erfassung potenzieller Pilot- und Demonstrationsprojekte.

Die Ergebnisse der Lead-User-Befragung und des Workshops wurden für die weitere Bearbeitung aufbereitet und dokumentiert (siehe Abbildung 38). Die erarbeiteten Anwendungsideen wurden in einem Innovationsworkshop in AP8 diskutiert und bewertet.

<ul style="list-style-type: none"> ■ Dachliegefenster: Farbstoffsolarzelle als semitransparentes Systemdachfenster, Integration in dachgestützte Photovoltaiklösung, gewonnene Energie kann eingespeist werden oder für zusätzlich Funktionen (z.B. Verschattung, Lichtsteuerung) genutzt werden. 	 <p>© Systaic 2007</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Fassadenelement: Farbstoffsolarzelle als Bestandteil einer multifunktionellen Fassade, neben Mustern sowie seinen Farb- und Transparenzeigenschaften kann Energie für Funktionen wie Belüftung, Klimatisierung, Verschattung, etc. genutzt werden. 	 <p>© Gattermann und Schossig Architekten, Capricorn Haus</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Photovoltaikverglasungen: Farbstoffsolarzellen werden als photovoltaisch aktive Elemente in Glasflächen von Atrien, Überdachungen, etc. eingebracht. Sie können dabei zusätzlich Funktionen übernehmen im Vordergrund steht neben der Energieerzeugung die Verschattung. 	

Abbildung 38: Darstellung von Anwendungsszenarien aus dem Lead User Workshop

AP 7.4: Ausarbeitung von Anwendungskonzepten für Farbstoffsolarzellen

Die Ergebnisse des Lead-User-Workshops, insbesondere die erfassten und bewerteten Anforderungen, wurden für die kooperative Technologieentwicklung in Modul 2 (AP 4 – 6) aufbereitet und gewichtet. Sie hatten maßgeblichen Einfluss auf die Größe und das Design der im folgenden zu entwickelnden Module (im Format 60 cm x 100 cm). Zudem wurden sie zur Überarbeitung des Anforderungskataloges in AP 1.3 genutzt.

Aufbauend auf den im Rahmen der Experteninterviews erfassten Anforderungen wurde in Zusammenarbeit von Engcotec, dem Borderstep Institut sowie dem Fraunhofer IAO und ISE ein Prototypenpanel konzipiert, das auf ersten Erkenntnissen für die Anwendung von Farbstoffsolarzellen in der gebäudeintegrierten Photovoltaik (z.B. Laminierung mit Sicherheitsglas) basiert. Dabei wurden auch unterschiedliche Designvarianten durchgespielt. Schlussendlich wurde die in Abbildung 39 dargestellte Variante ausgewählt.

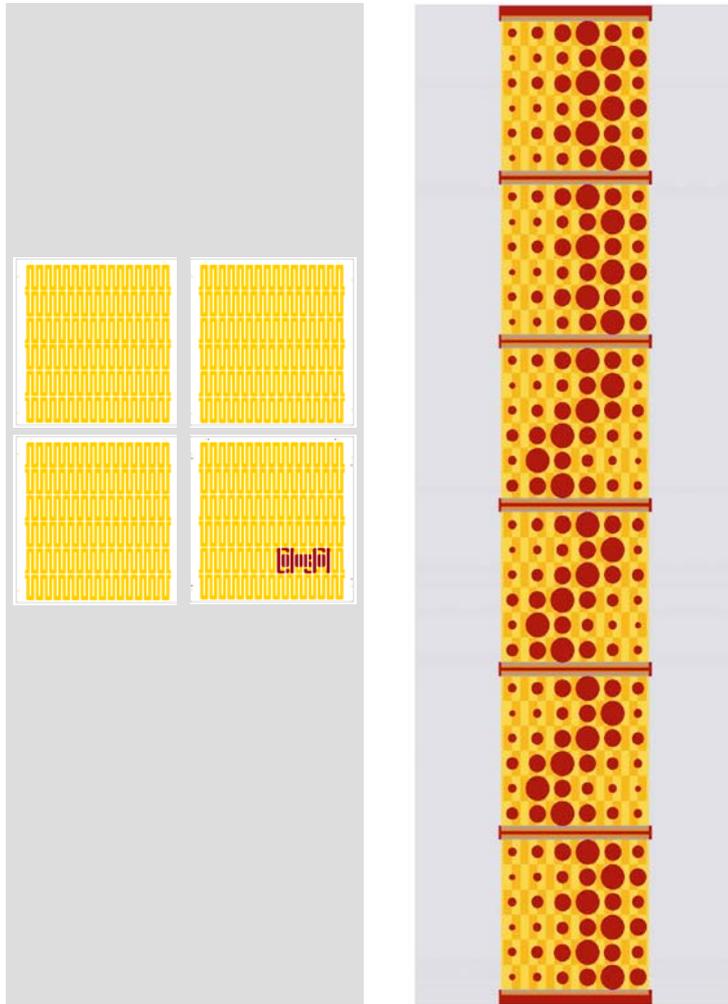


Abbildung 39: Ausgewähltes Design für das Prototypenpanel.

Ziel der Entwicklung war es, Funktionsvarianten für den Einsatz von Farbstoffsolarzellen in Fassaden (Warm- oder Kaltfassade) möglichst realitätsgetreu darzustellen, Gestaltungsfreiräume aufzuzeigen sowie Nutzungsmöglichkeiten mit Planern und potentiellen Anwendern und ggf. sonstigen Interessenten zu diskutieren.

Das Prototypenpanel wurde schließlich in AP7.6 gebaut. Die realitätsnahe Ausführung des Panels mit standardisierten Fassadensystemen ermöglicht es, für Entwicklungen im Projekt sowie auf Anregungen von Anwendern jeweils Tests und Messungen an Panelclustern zur funktionellen Integration mit potentiellen Verbrauchern in Fassaden (bspw. Jalousien, Blenden) durchzuführen. Das

Prototypenpanel diente zudem im Lead-User-Workshop der weiteren Klärung und Spezifizierung der Anforderungen an ein zukünftiges Produkt.

Basierend auf den Ergebnissen des Lead-User Workshops und den beim Bau des Prototypenpanels, wurde schließlich ein Konzept für eine Demonstrationsfläche von ca. 5 m² entworfen. Dies soll auf aufskalierten Modulen (60 cm x 100 cm) basieren und eine prototypische Fassadenanwendung unter realen Einsatzbedingungen testen.

Die entwickelten und bewerteten Anwendungsideen (insbesondere Fassadenelement) wurden mit den Marktabschätzungen aus AP 1.1 abgeglichen und führten zu einer weiteren Fokussierung auf die Fassadenanwendungen. Die Ergebnisse flossen zudem in die Ausgestaltung der Produkt-Roadmap (siehe AP 1.4) ein und sind dort dokumentiert.

AP 7.5: Zusammenarbeit und Abstimmung mit Entwicklungspartnern

Die in AP 7.1 gegründete Projektgruppe stellte das für die Abstimmung der Entwicklungsarbeiten im Projektkonsortium entscheidende Gremium dar. Neben den regelmäßig stattfindenden Projekttreffen, in denen der Stand der Arbeiten präsentiert und diskutiert wurde, wurden drei spezifische Workshops (Business-Innovations-Workshop, Strategieworkshop und Vermarktungsworkshop) mit ausgewählten Projektpartnern durch Engcotec und Borderstep vorbereitet und durchgeführt. Die Ziele und Ergebnisse dieser Workshops sind in AP 8 zusammengefasst.

AP 7.6: Prototypische Anwendungen und Feldtests in spezifischen Anwendungsfeldern

Im Vorhaben ColorSol wurden mit Projektbeginn an der Realisierung von Prototypen und der Durchführung von Feldtests gearbeitet. Zunächst wurden aufbauend auf dem vor Projektbeginn existierenden Modulformat (30 cm x 30 cm) Prototypen entwickelt, die auf dem Teststand des Fraunhofer ISE unter realen Bedingungen erprobt wurden (siehe Kap.2.7).

Das in AP7.4 konzipierte Prototypenpanel wurde am Fraunhofer ISE umgesetzt (vgl. Abbildung 40)



Abbildung 40: Foto des am Fraunhofer ISE hergestellten Prototypenpanel zur Farbstoffsolarzellenanwendung in Fassadenelementen. Die Abmessungen sind 2m x 0.7 m pro Einzelpanel. (Foto: Zuckerfabrik Fotodesign)

AP 7.7: Gewinnung von Allianzpartnern und Aufbau von Kooperationsstrukturen

Neben den in AP 1.1 und AP 1.4. ermittelten Marktpotentialen und Zielkosten wurden dafür insbesondere Gespräche mit möglichen Allianzpartnern für die Produktion und Vermarktung geführt. Dabei wurden Investitionsbedarfe und Vermarktungsstrukturen erfasst.

Im Rahmen von Messen und Konferenzen (vgl. AP9) wurden Prototypen vorgestellt und mit möglichen Partnern Teile des Vermarktungskonzeptes diskutiert.

Die entwickelte Kooperationsstrukturen und die damit verbunden Optionen der Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Partnern spielen bei zukünftigen Planungen einer Serieproduktion und Vermarktung eine wichtige Rolle.

Die Ergebnisse wurden in die Produkt-Roadmap und das Marktszenario 2010 (siehe AP 1.4) integriert und den Projektpartnern im Rahmen des Vermarktungsworkshops (siehe AP 8) vorgestellt.

2.6 Arbeitspaket 8: Innovationskooperation bei der Technologie- und Produktentwicklung

Die Arbeiten waren in 3 Unter-Arbeitspakete gegliedert, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

Arbeitspaket 8.1: Regelmäßige Arbeitstreffen zwischen den Verbundpartnern

Im Projektverlauf wurden zahlreiche Projekttreffen mit allen Projektpartnern sowie Arbeitstreffen mit ausgewählten Partnern durchgeführt, um Technologie- und Anwendungsentwicklung abzustimmen. Die Treffen wurden vom Fraunhofer IAO koordiniert, vorbereitet, moderiert und dokumentiert.

Weiterhin wurden in diesem Kontext die laufenden Arbeiten koordiniert und abgestimmt, sowie die Zeit- und Arbeitsplanung überarbeitet.

Arbeitspaket 8.2: Innovationsworkshop

Im Rahmen eines Innovationsworkshops wurden Chancenpotentiale und Zukunftsmärkte für Farbstoffsolarzellen auf der Grundlage der sowohl in AP 1 erarbeiteten Trendanalysen, Szenarien und Roadmaps als auch der in AP 3 ermittelten Erfolgsfaktoren für Produktinnovationen in der Solarindustrie erarbeitet und diskutiert.

Zunächst wurden die in AP7 erarbeiteten Anwendungsideen im Hinblick auf verschiedene Kriterien (wie z. B. Marktattraktivität, technische Umsetzbarkeit, Umweltwirkungen, benötigtes Know-How, generelle Risiken) diskutiert und bewertet. Es wurde die Umsetzung eines attraktiven Prototypenpanels auf Basis von 30 cm x 30 cm Modulen beschlossen und eine entsprechende Umsetzungsplanung erstellt. Entwicklung und Bau des Prototypenpanels erfolgten in AP7.

Weiterhin wurden Marktchancen und Marktgröße diskutiert und mögliche Geschäftsmodelle eruiert. Diese flossen in die erarbeiteten Verwertungspläne mit ein.

Arbeitspaket 8.3: Strategie-Workshop

Im Rahmen eines Strategie-Workshops wurden mit den Projektpartnern Möglichkeiten für eine zukünftige Zusammenarbeit zwischen den Praxispartnern diskutiert, ein gemeinsames Leitbild erarbeitet und die nächsten Schritte geplant, um Weiterentwicklung von Technologien und Anwendungskonzepten voranzubringen. Ergebnisse aus dieser Diskussion flossen in die erarbeiteten Verwertungspläne mit ein.

2.7 Solare Charakteristik der Module und Outdoor-Tests

Als elektrochemische Solarzellen verhalten sich Farbstoffsolarzellen bei niedriger Sonneneinstrahlung ähnlich wie eine Batterie und können so den erzeugten Photostrom optimal ausnutzen. Auf einem Außenteststand des Fraunhofer ISE (vgl. Abbildung 41) wurden im Projekt hergestellte Farbstoffsolarmodule bei unterschiedlichen solaren Einstrahlungsintensitäten über mehrere Monate hin vermessen. Der solare Wirkungsgrad dieser 30 cm x 30 cm großen Module betrug 5% gemessen auf der aktiven Fläche (70%) der Module. Wie erwartet zeigte sich ab Einstrahlungsstärken unterhalb 300 Watt pro Quadratmeter, d.h. unterhalb 0.3 Sonnenintensitäten, eine relativ gesehen höhere Leistung als bei vergleichbaren Solarmodulen aus kristallinem Silizium.



Abbildung 41: Photo eines Outdoorteststandes am Fraunhofer ISE zur Vermessung von Farbstoffsolarmodulen (im Vordergrund) unter verschiedenen Orientierungen

Als weiteres Charakteristikum wurde die Abhängigkeit des solaren Wirkungsgrades von der Orientierung der Farbstoffsolarmodule zum Einstrahlungswinkel der Sonne untersucht (s. Abbildung 3 unten). Hier zeigte sich im Vergleich eine deutlich geringere Abhängigkeit der relativen Leistung die auf eine gute optische Ankopplung an die photoaktive Schicht zurückzuführen ist. Ab einem Einstrahlungswinkel von 50 Grad konnte ein Vorteil von 10 % gegenüber einem Standardsolarmodul festgestellt werden. Dieser Umstand macht Farbstoffsolarmodule für den Einsatz in nicht immer optimal zu Sonne ausgerichteten Gebäudefassaden bei denen naturgemäß eine niedrigere Solareinstrahlung und größere Einstrahlwinkel vorherrschen prädestiniert.

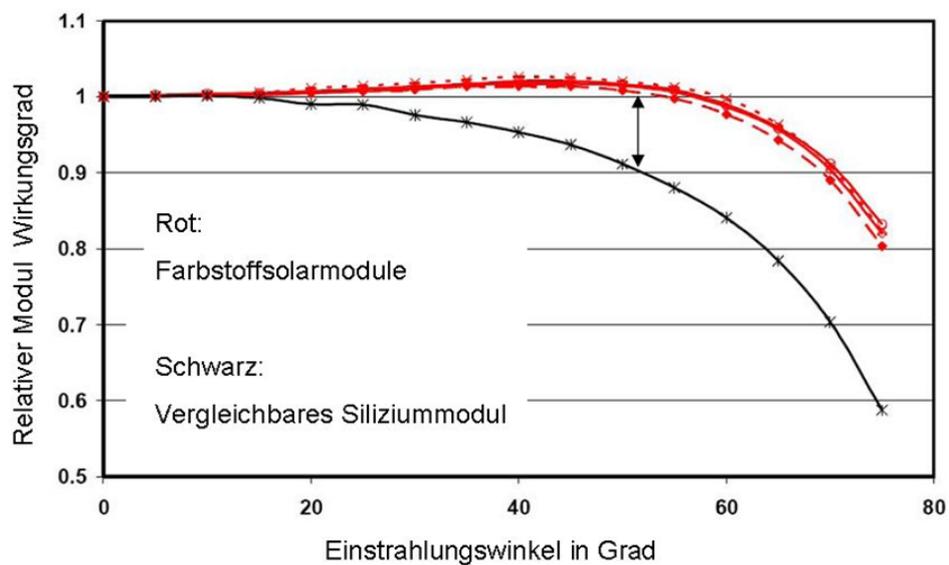


Abbildung 42: Relativer Wirkungsgrad, d.h. relative solare Leistung, von im Projekt ColorSol hergestellten Farbstoffsolarmodulen der Größe 30 cm x 30 cm als Funktion des Einstrahlungswinkels. Der Vergleich zu einem kommerziellen Solarmodul mit Zellen aus kristallinem Silizium ist gezeigt.

3 Modul Ergebnistransfer

Im Rahmen des Moduls Ergebnistransfer (AP9) wurden die im Rahmen des Vorhabens ColorSol gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen ausgewertet, generalisiert und der Öffentlichkeit präsentiert. Zielgruppen waren dabei wissenschaftliche Experten, Unternehmen und generell mögliche Nutzer der Technologie (zur Zusammenarbeit mit Projekt-externen Partnern siehe auch Teil I, Kap. 5 dieses Berichts).

Website

Auf der Website www.colorsol.de wurde ein Web-Auftritt mit Informationen zur Farbstoffsolarzellentechnologie und Ergebnissen aus dem Projekt ColorSol veröffentlicht.

Transfer-Veranstaltungen

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Transfer-Veranstaltungen durchgeführt:

- In zwei Firmeninformationstagen am 6. 7. 2006 und am 13. 7. 2006 in Freiburg wurde die Farbstoffsolarzellentechnologie interessierten Firmen demonstriert und über technische und marktliche Entwicklungsmöglichkeiten diskutiert.
- In einem Lead-User Workshop, organisiert durch das Borderstep Instituts, wurde mit trendführenden Nutzern aus dem Bereich gebäudeintegrierter Photovoltaik und der Fassadenplanung am 10.10.2007 am Fraunhofer IAO in Stuttgart über die Farbstoffsolarzellentechnologie und deren Anwendungsmöglichkeiten diskutiert sowie Nutzeranforderungen aufgenommen.
- In einem Workshop bei der Fa. Systaic wurden am 19. 11. 2007 in Berlin Zwischenergebnisse für Unternehmensvertreter und interessierte Kreise aus den relevanten Akteursnetzen präsentiert und diskutiert.
- Auf der Abschlussveranstaltung des Projekts am 28. 11. 2008 in Freiburg wurden die Ergebnisse des Projekts einem Publikum aus Industrie und Forschung vorgestellt und diskutiert.
- In zahlreichen Einzelgesprächen mit interessierten Kooperationspartnern aus Wirtschaft und Forschung wurden Möglichkeiten der Kooperation und einer Vermarktung der Technologie nach Projektabschluss diskutiert.

Veröffentlichungen

Ergebnisse des Projekts wurden in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

- Beucker, S.; Fichter, K.; Lang-Koetz, C.: Innovation Communities in Technology Development Processes – A Case Study from the Field of Dye

Sensitized Solar Cells, in: The Centre for Sustainable Design (Eds.): Proceedings of Sustainable Innovation 08, Future products, technologies and industries, Towards Sustainable Product Design: 13th International Conference, 27 & 28 October 2008, Malmö University, Malmö, Sweden, 2008

- Beucker, S.; Hinsch, A.; Brandt, H.; Veurman, W.; Flarup Jensen, K., Lang-Koetz, C. and Stabe, M. (2009): Scaling-Up of Glass Based DSC-Modules for Applications in Building Integrated Photovoltaics, in Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 7-12 2009
- Hinsch, A., H. Brandt, W. Veurman, S. Hemming, M. Nittel, U. Würfel, P. Putyra, C. Lang-Koetz, M. Stabe, S. Beucker and K. Fichter (2009): Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 93, Issues 6-7, June 2009, Fukuoka, Japan, Pages 820-824, 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, doi:10.1016/j.solmat.2008.09.049
- Hinsch, A., H. Brandt, W. Veurman, S. Hemming, M. Nittel, U. Würfel, P. Putyra, C. Lang-Koetz, M. Stabe, S. Beucker and K. Fichter (2009): Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 93, Issues 6-7, June 2009, Pages 820-824, 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, doi:10.1016/j.solmat.2008.09.049
- Lang-Koetz, C., Hinsch, A., Beucker, S.: Farbige Solarzellen. Grundlage für eine attraktive gebäudeintegrierte Photovoltaik, in: Erneuerbare Energien, März 2009, S. 51-55, SunMedia Verlags GmbH, Hannover, 2009.
- Lutz, A., Heubach, D., Lang-Koetz, C. (2007): Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle - Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs, Bericht aus dem Forschungsprojekt ColorSol, Fraunhofer IAO, Stuttgart. Download unter: http://www.colorsol.de/fhg/Images/Rutheniumstudie_tcm294-101481.pdf
- Rist, M.; Pastewski, N.: Die Technologie der Farbstoffzelle, Zeitschrift Sonne, Wind & Wärme, Vol.32 (2008), No.14, pp.130-133
- Spath, D., Lang-Koetz, C., Beucker, S. (2007): Nachhaltiges Technologie-Roadmapping in Forschungsprojekten am Beispiel der Farbstoffsolarzellenentwicklung im BMBF-Verbundprojekt ColorSol, in Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung : 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, HNI-Verlagsschriftenreihe, 219, Universität Paderborn Heinz Nixdorf Inst., S. 72-96, Paderborn 2007.

Vorträge

Die Farbstoffsolarzellentechnologie und Ergebnisse aus dem Projekt ColorSol wurden in folgenden Vorträgen vorgestellt:

- 4.-8.9.2006, Dr. Andreas Hinsch, 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden,
- 18.10.2006, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE: Beschichtungsverfahren für Farbstoffsolarzellen, IDS Gesellschaft, Würlitz,
- 20.10.2006, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE: Farbstoffsolarzellen und ihre Anwendungsmöglichkeiten, Fenstertage Rosenheim, Rosenheim,
- 26.10.2006, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE: Farbstoffsolarzellen und ihre Anwendungsmöglichkeiten, Messe Glastec, Düsseldorf,
- 22. – 23. 1. 2007, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE und Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut: Präsentation u. Diskussion des Projekts auf einem Treffen der European Coordination Action OrgaPVnet in Berlin,
- 13. 2. 2007, Daniel Heubach, Fraunhofer IAO: Einbeziehung von Umweltschutz-anforderungen in Innovationsprozesse der Solarwirtschaft am Beispiel des Verbundprojekts ColorSol, Expertenworkshop nova-net: Entstehungspfade von Nachhaltigkeitsinnovationen, Berlin,
- 20. 4. 2007, Dr. Claus Lang-Koetz, Fraunhofer IAO: Präsentation des Projekts im Vortrag „Innovation durch Nanotechnologie in der Umwelttechnik“ am Institut INNO-tec der LMU München,
- 24. 5. 2007: Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut, Vortrag bei Treffen der European Coordination Action OrgaPVNet in Prag,
- 14. 6. 2007, Dr. Claus Lang-Koetz, Fraunhofer IAO: Nachhaltiges Technologie-Roadmapping in Forschungsprojekten am Beispiel der Farbstoffsolarzellenentwicklung im BMBF-Verbundprojekt ColorSol, auf dem 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, Gütersloh, 2007.
- Juli 2007, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3.-7.9.2007, Mailand, Italien,
- September 2007, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE und Dr. Thomas Schubert, Fa. IoLiTec, Vorträge auf der Dye Solar Cell Industrialisation Conference 2007, 11.-13.9. 2007, St. Gallen, Schweiz,

- 7.12. 2007, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE, Vortrag auf der 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 3.-7.12. 2007, Fukuoka, Japan,
- 09.06.2008, Nico Pastewski, Fraunhofer IAO: Vortrag Product Lifecycle Management Strategy for a Sustainable Product Innovation with a New Photovoltaic Technology - Dye Solar Cell, 5th International Conference on Product Lifecycle Management (PLM'08), Seoul,
- 20. 2. 2008, Dr. Thomas Schubert, Fa. IoLiTec, Vortrag auf der Konferenz zur weiteren Industrialisierung der Photovoltaiktechnologie, abgehalten von EPIA, dem Dachverband der europäischen Solarzellenindustrie, München,
- 24. 9. 2008, Dr. Claus Lang-Koetz, Fraunhofer IAO, Vortrag über Farbstoffsolarzellen auf dem BMBF-Forum für Nachhaltigkeit 2008 in Berlin,
- 23. 4. 2009, Dr. Claus Lang-Koetz, Fraunhofer IAO, Vortrag über Farbstoffsolarzellen auf dem Thin Film Industry Forum 2009 in Berlin.
- 24. 4. 2009, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE: Vortrag Scaling up of glass-based DSC modules for application in building integrated PV auf der 3rd International Conference of the Industrialisation of DSC, Nara, Japan,
- 11. 6. 2009, Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut: Vortrag Scaling-Up of Glass Based DSC-Modules for Applications in Building Integrated Photovoltaics, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 7.-12. 6. 2009
- 12. 6. 2009, Dr. Andreas Hinsch, Fraunhofer ISE: Eingeladener Vortrag Upscaling Dye Solar Modules – the Microscopic Picture auf dem Spring Meeting European Material Research Society in Strasbourg, Frankreich.

Präsentation bzw. Auftritte auf Konferenzen und Messen

Die Farbstoffsolarzellentechnologie und das Projekt ColorSol wurden auf folgenden Konferenzen und Messen präsentiert:

- April 2006, Hannover Messe Industrie: Präsentation eines FSZ-Exponats auf einem eigenen Messestand durch Fraunhofer ISE,
- 23.-25.10.2006, 3. BMBF-Forum für Nachhaltigkeit, Haus der Wirtschaft, Berlin), Ausstellung eines Farbstoffsolarzellen-Exponats.
- 21.-23. 2. 2007, Messe nano tech 2007 Japan 2007: Präsentation eines FSZ-Exponats auf dem Messestand des Fraunhofer ISE,

- 8.-10.5. 2007, BMBF-Forum Nachhaltigkeit „Sustainable Neighbourhood – from Lisbon to Leipzig through Research (L2L)“, Leipzig, Ausstellung eines Farbstoffsolarzellen-Exponats mit Postern und Informationsmaterial,
- 21.6.2007 - 23.6.2007 Fachmesse Intersolar 2007, München: Präsentation eines FSZ-Exponats auf dem Stand des Fraunhofer ISE,
- 3.-7.9.2007, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Mailand, Italien: Präsentation des FSZ-Prototypenpanel auf dem Stand des Fraunhofer ISE,
- 11.-13.9.2007, Messe NanoEurope mit Dye Solar Cell Industrialisation Conference 2007, St. Gallen, Schweiz: Präsentation des FSZ-Prototypenpanel auf dem gemeinsamen Stand des Projekts ColorSol mit der Firma IoLiTec,
- 13.-15.2. 2008, nano tech 2009 International Nanotechnology Exhibition & Conference, Tokyo, Japan: Präsentation des FSZ-Prototypenpanel auf dem Stand des Fraunhofer ISE,
- Fachmesse Intersolar, 12.-14. 6. 2008, München: Präsentation des FSZ-Prototypenpanel auf dem Stand des Fraunhofer ISE.

Transfer in die Lehre

Projektergebnisse wurden in vielfältiger Weise im Rahmen von Lehraktivitäten genutzt. Hierzu zählen Vorlesungen, Seminare als auch studentische Arbeiten, wie Praktika, Studien- und Diplomarbeiten.

Berichte über das Projekt in den Medien

In folgenden Artikeln oder Beiträgen wurde über das Projekt ColorSol in den Medien berichtet:

- Erwähnung des Projekts im Artikel kunststoffzeit, Kunststoffe als Multifunktionale (bau)werkstoffe in der db deutsche bauzeitung vom 1. 08. 2008.
- Artikel in der energy2.0 week, 09.12.2008 Ausgabe 25: Attraktive Solarzellen auf Farbstoff-Basis. Farb- und Formvarianten geben Architekten Impulse für die Fassadengestaltung
- Artikel in der Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung, 30. 11. 2008, Ausgabe Nr. 48: Ein Hauch von Hibiskus
- Artikel im Fraunhofer-Magazin weiter.vorn, Ausgabe Februar 2009: Fassaden als Kraftwerke

- Radiobetrag im Deutschlandfunk, 28. 11. 2008: Fassade produziert Strom, Fotovoltaikmodule für die Hauswand nähern sich Einsatzreife, siehe <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/883551/>
- Radiobeitrag auf Deutsche Welle Radio am 28. 1. 2009: Dye Sensitised Solar Cell Technology, siehe <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,3970703,00.html>
- Artikel in der Zeitung WirtschaftsWoche, Ausgabe Nr. 20 vom 11.5.2009: Strom aus Farbe

4 Literatur

Angerer, G., F. Marscheider-Weidemann, A. Lüllmann, L. Erdmann, M. Scharp, V. Handke und M. Marwede (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Schlussbericht, Berlin, Karlsruhe.

Chiba, Y. , A. Islam, Y. Watanabe, R. Komiya, N. Kodie, L. Han, Dye-sensitised solar cells with conversion efficiency of 11.1%, Japanese Journal of Applied Physics 45 (2006) L638–L640.

Dai, S. (2005), Sol. Energy Mater. Sol. Cells 85 (2005) Seite 447-455

Deutscher Bundestag (2004): TA-Projekt Nanotechnologie, Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, 15. März 2004, Deutscher Bundestag Drucksache 15/2713, herausgegeben als Arbeitsbericht Nr. 92, Juli 2003

de Vries, J. G., B. J. R. Scholtens, et al. (2000). Negative Ames-Test of cis-di(thiocyanato)-N, N'-bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)Ru(II), the sensitizer dye of the nanocrystalline TiO₂ solar cell, Elsevier Science B.V.

Frost & Sullivan Technical Insights, Photovoltaic Materials – An Analysis of emerging Technology and Markets (D194), 2001

Frost&Sullivan (2003a): Next Generation of Solar Cells, Market Insight, November 2003.

Frost&Sullivan (2003b): Environmental Sensing and Monitoring – Technology Developments and Growth Opportunities, 2003

Frost & Sullivan Futuretech Alert (2004): Solar Power – on the Rise When Oil Prices Are - or Even When They Aren't, 20 Aug 2004

Hinsch, A., H. Brandt, W. Veurman, S. Hemming, M. Nittel, U. Würfel, P. Putyra, C. Lang-Koetz, M. Stabe, S. Beucker and K. Fichter (2008): Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 93, Issues 6-7, June 2009, Pages 820-824, 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, doi:10.1016/j.solmat.2008.09.049

Hinsch, A. (2001), Prog. Photovoltaics 9 (2001) Seite 425-438

Johnson Matthey. Download unter http://www.platinum.matthey.com/analyst_index.html. Aufruf: 04.02.2008. 2008.

Kleinauf, W., Burger, B., Cramer, G., Haas, O., Strauß, P.: Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – Dezentrale Strukturen und modulare Systemtechnik, in

Forschungsverbund Sonnenergie (Hrsg.): Themenheft 2001: Integration erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen, 2001, im Internet verfügbar unter <http://www.fv-sonnenenergie.de>

Lutz, A., Heubach, D., Lang-Koetz, C. (2007): Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle - Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs, Bericht aus dem Forschungsprojekt ColorSol, Fraunhofer IAO, Stuttgart. Download unter: http://www.colorsol.de/fhg/Images/Rutheniumstudie_tcm294-101481.pdf

Okada, K. J. (2004) Photochem. Photobio. A-Chem. 164 (2004) Seite 193-198

O'Regan, B. (1991), Nature 353 (1991) Seite 737-740

Quaschnig, V. (2008): Übersicht aus verschiedenen Quellen, zusammengestellt von Prof. Dr. Volker Quaschnig, Homepage mit Informationen zu regenerativen Energien und Klimaschutz, <http://www.volker-quaschnig.de/>, Berlin, letzter Zugriff: Dezember 2008

Rist, M., N. Pastewski (2008): Die Technologie der Farbstoffsolarzelle, Sonne, Wind & Wärme 14, 2008, S.130-133.

Sastrawan, R., J. Beier, U. Belledin, S. Hemming, A. Hinsch, R. Kern, C. Vetter, F.M. Petrat, A. Prodi-Schwab, P. Lechner and W. Hoffmann (2006), New interdigital design for large area dye solar modules using a lead-free glass frit sealing, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **14** (8) (2006), pp. 697–709

Schär, S.: Nassvermahlung und Dispergierung im nanskaligen Bereich mi Rührwerkskugelmühlen, 1-2005

Schmidt-Bleek, F. B.: Das MIPS-Konzept: Weniger Naturverbrauch - mehr Lebensqualität durch Faktor 10. München: Droemer Knauer, 1998.

Spath, M. (2003), Prog. Photovoltaics 11 (2003) Seite 207-220

Toyoda, T. J. (2004), Photochem. Photobio A-Chem 164 (2004) Seite 203-207

Wang, P. (2003), Nature Mat. 2 (2003) Seite 402-407

Wang, P. (2005), App. Phys. Let. 86 (2005) Seite 123508

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung der Projektergebnisse

Durch die Projektarbeiten wurden substantielle wissenschaftliche sowie praxisrelevante Erkenntnisse und Ergebnisse geschaffen auf dem Weg zu einer Serienreife der Farbstoffsolarzellentechnologie.

Während des Projekts wurde ein intensiver Dialog mit möglichen Anwendern der Technologie sowie wissenschaftlichen Experten und interessierten Unternehmen geführt und Ergebnisse an diese transferiert. Eine Übersicht der umfangreichen Transferaktivitäten findet sich in Kap. 3 oben.

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat am 11.5.2006 die Bezeichnung ColorSol® in Deutschland als Marke angemeldet. Die Marke wurde am 27.6.2006 in das Register des Deutschen Patent- und Markenamtes eingetragen.

Ansonsten wurden keine Patente angemeldet.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten/ Anschlussfähigkeit

Mit der Entwicklung innovativer Farbstoffsolarzellen (FSZ) werden zahlreiche kostengünstige neue Anwendungsfelder für die solare Energieerzeugung erschlossen und damit fossile Energieträger geschont. FSZ besitzen auf Grund ihres geringen Energieeinsatzes in der Herstellungsphase eine positive CO₂-Bilanz. Ihr Einsatz ist daher auch vor dem Hintergrund von CO₂-Reduktionszielen gesellschaftlich und politisch relevant. Deutschlands Vorreiterposition im Bereich der Solarenergie kann damit gestärkt und weiter ausgebaut werden. Als potenzielles, neues Anwendungsgebiet der FSZ-Technologie ist insbesondere der Einsatz in photovoltaischen Gebäudefassaden zu sehen (gebäudeintegrierte Photovoltaik GIPV). Dazu sind die Solarzellen sowohl wegen der Variabilität des optischen Farbeindrucks, als auch auf Grund durch Siebdruck graphisch attraktiv zu gestaltenden photoaktiven Oberflächen sehr gut geeignet. Somit lassen sich bunt gefärbte Fassadenelemente mit FSZ zur solaren Stromerzeugung verwirklichen. Darüber hinaus besitzen FSZ durch ihre kostengünstige Produktion ein hohes Einsatzpotenzial sowohl in einheimischen Märkten als auch in Entwicklungsländern.

Die beteiligten Firmen und Institute sehen konkrete wirtschaftliche Erfolgsaussichten, sodass eine Anschlussfähigkeit der Ergebnisse als gesichert angesehen werden kann (vgl. hierzu die Erfolgskontrollberichte).

Die beteiligten Unternehmen beabsichtigen, die Technologie weiterzuentwickeln und mittelfristig auf Basis der durchgeführten Entwicklungen Produkte und Dienstleistungen für Farbstoffsolarzellen-Komponenten anzubieten.

Fraunhofer ISE und Energy Center of the Netherlands ECN (Petten, Niederlande) haben eine Kooperationsvereinbarung geschlossen, mit dem Ziel die Kommerzialisierung der Farbstoffsolarzellentechnologie voranzubringen.

Weiterhin fließen Erkenntnisse in Industrieprojekte des Fraunhofer IAO für mehrere mittelständische und größere Industrieunternehmen ein. Bspw. werden in sog. TechnologieRadar-Projekten Technologietrends ermittelt und für die spezifische Situation des jeweiligen Unternehmens aufbereitet, um z. B. die Anwendungsreife bestimmter Technologien zu ermitteln oder auch neue Ideen für zukünftige Produkte und Geschäftsfelder zu entwickeln.

Wissenschaftliche Erfolgsaussichten/ Anschlussfähigkeit

Die Projektergebnisse wurden und werden der wissenschaftlichen Fachwelt durch Publikationen sowie durch Vorträge im Rahmen von Workshops sowie auf Kongressen und Konferenzen präsentiert. Weitere Informationen zu den Publikationen finden sich in der Veröffentlichungsliste.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Partner flossen bzw. fließen in einige weitere Forschungsprojekte ein (vgl. Erfolgskontrollberichte):

- Demonstrationsinstallation für Farbstoffsolarzellen in Baden-Württemberg, gefördert durch das Umweltministerium Baden-Württemberg im Programm „Betriebliche Umwelttechnik“,
- BMBF-Projekt Aufskalierbare Farbstoffsolarzellen (FSZ-Industrie) im Förderschwerpunkt Organische Photovoltaik,
- Robust-DSC Efficient and Robust Dye Sensitized Solar Cells and Modules im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union, Grant Agreement No. 212792,
- Forschungsprojekt „Innovation Communities“ (www.innovation-communities.de) mit Praxispartnern aus dem Bereich Farbstoffsolarzelle,
- Forschungsprojekt MaRess („Materialeffizienz und Ressourcenschonung“, für das Bundesumweltministerium und das Umweltbundesamt),
- BMBF-Projekt Ressourceneffizienzatlas.

Weiterhin fließen methodische Erkenntnisse bei der Entwicklung von Anwendungsszenarien und der Umweltwirkungsbewertung in weitere Forschungsprojekte des Fraunhofer IAO ein.

6 Bekannt gewordener Fortschritt im Bereich Farbstoffsolarzellen bei anderen Stellen

Wie in den Berichten zu Modul 1 dargestellt, wird weltweit in einer Vielzahl von Forschungsinstituten und Firmen an der Weiterentwicklung der Farbstoffsolarzellentechnologie geforscht. Den Fortschritt der Arbeiten aller dieser Organisationen darzustellen, würde den Rahmen dieses Berichts sprengen. Im Folgenden sind die wichtigsten Entwicklungen aus Sicht des Projektkonsortiums dargestellt:

- Erhöhung des maximal bisher erreichten Wirkungsgrades von Farbstoffsolarzellen auf 11,2 % durch die Firma Sharp (vgl. Chiba et al. 2006).
- Fa. DyeSol, Australien: DyeSol fungiert weiterhin als Zulieferer und Ausrüster für Materialien und Produktionstechnik für Farbstoffsolarzellen. Das Unternehmen hat weitere Kooperationen in verschiedenen Ländern angestoßen, die zu einer Serienproduktion von FSZ-Modulen führen können. Interessant ist in diesem Kontext insbesondere die F&E-Kooperation mit dem Stahlhersteller Corus in Großbritannien. Momentan ist jedoch noch kein Starttermin für eine mögliche Serienproduktion bekannt.
- Fa. G24i, Wales: G24i spezialisiert sich auf Herstellung und Verkauf von flexiblen Farbstoffsolarzellen für den mobilen Einsatz, z. B. zum Aufladen von Mobiltelefonen in abgelegenen Regionen der Welt oder in Entwicklungsländern. Trotz mehrfacher Ankündigungen ist laut aktuellen Informationen noch kein Produktionsstart erfolgt.
- Das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle in Japan besteht aus einer Vielzahl von Akteuren. Wichtige Akteuren kommen aus Unternehmen, Forschung und Politik (Toyota/ Aisin Seiki, Sharp, Universitäten, NEDO, etc.). Die Farbstoffsolarzellentechnologie wird in Japan weiterhin mit staatlicher Unterstützung und großer Kontinuität weiterentwickelt. Japanische Unternehmen zählen daher bezüglich der Forschung, Entwicklung und Kommerzialisierung weltweit zu den wichtigsten Akteuren auf dem Gebiet der Farbstoffsolarzelle. Der Beginn einer Serienproduktion ist jedoch noch schwer abzuschätzen.
- BMBF-Projekt FSZ-Industrie: Im neu aufgelegten BMBF-Förderschwerpunkt Organische Photovoltaik wird das Verbundforschungsprojekt FSZ-Industrie gefördert, das sich mit der Aufskalierung der Farbstoffsolarzellentechnologie beschäftigt. Neben dem Fraunhofer ISE und den Firmenpartnern aus ColorSol sind weitere namhafte Unternehmen an diesem Projekt beteiligt, das von der Fa. Merck geleitet wird.

7 Veröffentlichungsliste

Ergebnisse des Projekts wurden in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

- Beucker, S.; Fichter, K.; Lang-Koetz, C.: Innovation Communities in Technology Development Processes – A Case Study from the Field of Dye Sensitized Solar Cells, in: The Centre for Sustainable Design (Eds.): Proceedings of Sustainable Innovation 08, Future products, technologies and industries, Towards Sustainable Product Design: 13th International Conference, 27 & 28 October 2008, Malmö University, Malmö, Sweden, 2008
- Beucker, S.; Hinsch, A.; Brandt, H.; Veurman, W.; Flarup Jensen, K., Lang-Koetz, C. and Stabe, M. (2009): Scaling-Up of Glass Based DSC-Modules for Applications in Building Integrated Photovoltaics, in Proceedings of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, Pennsylvania, June 7-12 2009
- Hinsch, A., H. Brandt, W. Veurman, S. Hemming, M. Nittel, U. Würfel, P. Putyra, C. Lang-Koetz, M. Stabe, S. Beucker and K. Fichter (2009): Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 93, Issues 6-7, June 2009, Fukuoka, Japan, Pages 820-824, 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, doi:10.1016/j.solmat.2008.09.049
- Hinsch, A., H. Brandt, W. Veurman, S. Hemming, M. Nittel, U. Würfel, P. Putyra, C. Lang-Koetz, M. Stabe, S. Beucker and K. Fichter (2009): Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 93, Issues 6-7, June 2009, Pages 820-824, 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, doi:10.1016/j.solmat.2008.09.049
- Lang-Koetz, C., Hinsch, A., Beucker, S.: Farbige Solarzellen. Grundlage für eine attraktive gebäudeintegrierte Photovoltaik, in: Erneuerbare Energien, März 2009, S. 51-55, SunMedia Verlags GmbH, Hannover, 2009.
- Lutz, A., Heubach, D., Lang-Koetz, C. (2007): Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle - Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs, Bericht aus dem Forschungsprojekt ColorSol, Fraunhofer IAO, Stuttgart. Download unter: http://www.colorsol.de/fhg/Images/Rutheniumstudie_tcm294-101481.pdf
- Rist, M.; Pastewski, N.: Die Technologie der Farbstoffzelle, Zeitschrift Sonne, Wind & Wärme, Vol.32 (2008), No.14, pp.130-133
- Spath, D., Lang-Koetz, C., Beucker, S. (2007): Nachhaltiges Technologie-Roadmapping in Forschungsprojekten am Beispiel der Farbstoffsolarzellenentwicklung im BMBF-Verbundprojekt ColorSol, in Gausemeier,

Jürgen (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung : 3. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung Heinz Nixdorf Institut, HNI-Verlagsschriftenreihe, 219, Universität Paderborn Heinz Nixdorf Inst., S. 72-96, Paderborn 2007.