

NOV
2020
06

SCIENCE
BRUNCH

www.klimafonds.gv.at

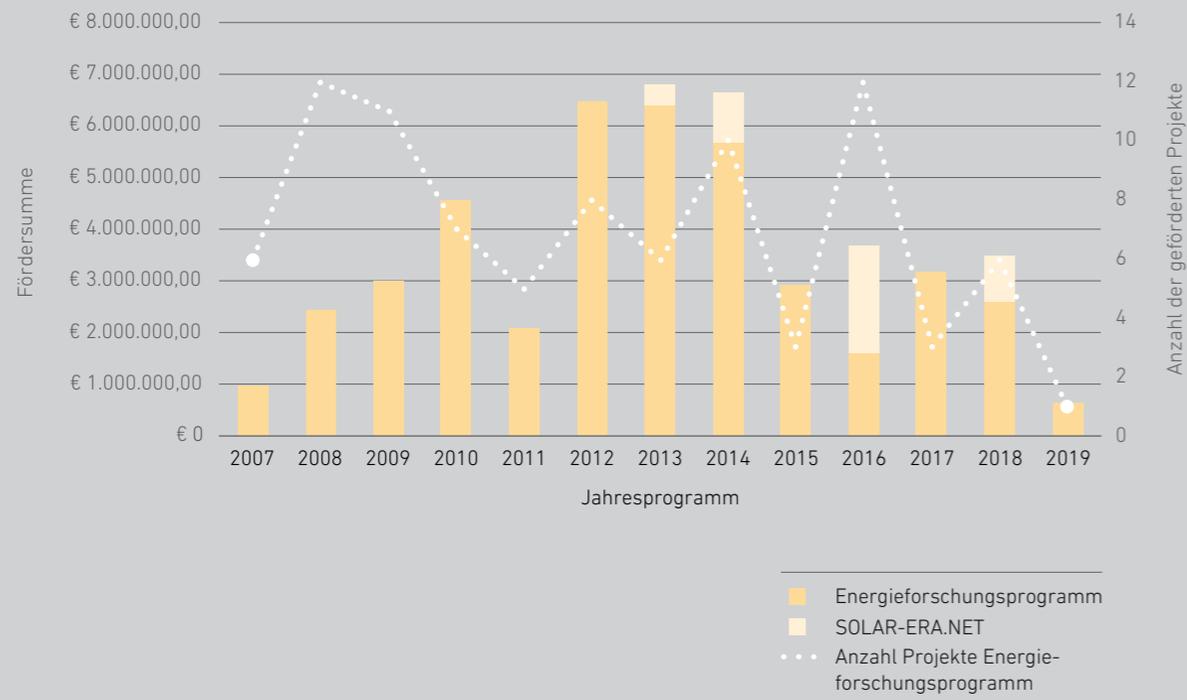


Photovoltaik: Die Kraft der Sonne nutzen!

Vorwort	03
<hr/>	
IPERMON: Innovative Performance Monitoring System for Improved Reliability and Optimized Levelized Cost of Electricity	05
<hr/>	
<p>Entwicklung einer innovativen Zustandsüberwachungsplattform für proaktive und reaktive O&M mit erweiterten Datenanalysefunktionen.</p>	
LiquidSi 2.0: Liquid phase deposition of Functional Silicon Layers for Cost-Effective High Efficiency Solar Cells	15
<hr/>	
<p>Im vorliegenden Projekt werden primär neuartige Synthesekonzepte zur kostengünstigen Abscheidung von Siliciumschichten entwickelt. Die resultierenden Si-Schichten werden außerdem in Hinblick auf ihre Eignung für photovoltaische Anwendungen charakterisiert und in Prototypen kostengünstiger und hocheffizienter Photozellen getestet.</p>	
Cover Power: Smart Glass Coatings for Innovative BiPV Solutions	27
<hr/>	
<p>Cover Power beschäftigt sich intensiv mit der ästhetischen Verträglichkeit von gebäudeintegrierten Solarmodulen. Insbesondere werden verschiedene neuartige Beschichtungstechnologien zur Farbgebung und Blendreduktion auf ihre optischen Eigenschaften und ihre chemische Stabilität evaluiert. Beschichtete, farbige Solarmodule werden dann in einer Testfassade einem Feldtest unterzogen.</p>	
Bi-Face: High-efficiency bifacial PV Modules and Systems for flat roofs	35
<hr/>	
<p>The scope of BI-FACE is to develop innovative bifacial modules and systems for flat roofs. The results include three novel variations for bifacial modules and systems which are tested in three different climate areas: subtropical (Cyprus), temperate (Austria) and maritime temperate (Netherlands).</p>	
1500 SiC: Develop a new photovoltaic inverter with SiC for full power operation at 1500V	43
<hr/>	
<p>Im Projekt 1500-SiC wurden neuartige Halbleiterbauelemente für den Einsatz in modernsten PV-Anlagen mit 1500 V Paneltechnik entwickelt. Es entstand ein Technologiedemonstrator, der erstmals den Einsatz dieser hocheffizienten Siliziumkarbid (SiC)-basierten Chips im Bereich der sogenannten Zentralwechselrichter höherer Leistungen ermöglicht und dabei die Effizienz und die Robustheit des Gesamtsystems signifikant verbessert.</p>	
Duracis: Advanced global encapsulation solutions for long term stability in industrial flexible CI(G)S photovoltaic technology	55
<hr/>	
<p>Für den Durchbruch von flexiblen Photovoltaiktechnologien ist die Verfügbarkeit von günstigen Verkapselungsmaterialien mit ausgezeichnete Barriereigenschaften gegenüber äußeren Einflüssen notwendig. Im DURACIS Projekt werden flexible Verpackungskonzepte entwickelt, die eine signifikante Verlängerung der Lebensdauer bei reduzierten Kosten ermöglichen.</p>	
Alle geförderten Projekte im Überblick	61
<hr/>	

Photovoltaik: Die Kraft der Sonne nutzen!

Geförderte Projekte aus den Programmen Energieforschung und SOLAR-ERA.NET



QUELLE:
Klima- und Energiefonds, Stand: September 2020



„Unser Energiesystem steht vor großen Herausforderungen und vor einem großen Umbruch! Umso wichtiger sind innovative Lösungen ‚Made in Austria‘ im Bereich der erneuerbaren Stromgewinnung. Durch seine Förderprogramme leistet der Klima- und Energiefonds einen wichtigen Beitrag und unterstützt die Bundesregierung aktiv bei dem ambitionierten Ziel Klimaneutralität 2040.“

THERESIA VOGEL, GESCHÄFTSFÜHRERIN DES KLIMA- UND ENERGIEFONDS

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

Österreich hat sich das Ziel gesetzt, bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Dabei werden erneuerbare Energien in unserem zukünftigen Energiesystem eine essentielle Rolle einnehmen. Umso wichtiger ist eine klimaverträgliche und umweltfreundliche Stromproduktion. Insbesondere die Stromgewinnung mit der Kraft der Sonne wird einen erheblichen Beitrag leisten und schafft zusätzlich regionale Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Österreich.

Deshalb investiert der Klima- und Energiefonds seit seiner Gründung im Jahr 2007 in Forschungsprojekte im Bereich Photovoltaik und konnte rund 90 nationale und internationale Projekte ermöglichen und mit einem Fördervolumen von fast 47 Millionen Euro unterstützen. Durch diese Förderungen können wichtige Innovationen erzielt werden und eine nachhaltige und günstige Stromversorgung ermöglicht werden.

Auch auf europäischer Ebene werden seit 2012 im Rahmen des internationalen SOLAR-ERA.NET Programms transnationale Forschungsprojekte gefördert um die Stromproduktion mit Sonnenkraft zu verbessern. SOLAR-ERA.NET ist ein europäisches Netzwerk nationaler und regionaler Förderorganisationen sowie FTE- und Innovationsprogrammen.

Der Klima- und Energiefonds und das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) unterstützen mit ihrer Teilnahme die koordinierte Förderung transnationaler Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Photovoltaik. Von insgesamt 88 SOLAR-ERA.NET Forschungsprojekten konnte Österreich bei 20 mitwirken und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Innovationsführerschaft Europas und treibt damit den internationalen Forschungs- und Wissensaustausch voran.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünschen Ihnen

Ihr Klima- und Energiefonds



Projektleitung: JÜRGEN SUTTERLÜTI
Gantner Instruments GmbH

Ipermon

IPERMON

Innovative Performance Monitoring System for Improved Reliability and Optimized Levelized Cost of Electricity

Einleitung / Ausgangssituation

Der weltweite Photovoltaik (PV) Markt verzeichnet nach wie vor großes Wachstum mit über 100 GW an jährlich neuen PV Installation weltweit. Damit ist PV einer der wesentlichen Pfeiler damit die Ziele des „Green Deal“ der Europäischen Union erreicht werden können. Deshalb ist es für die PV immens wichtig die Stromgestehungskosten weiter zu reduzieren und die Energieproduktion über die PV Lebensdauer zu erhöhen.

Dies kann durch eine genaue und zuverlässige Überwachung der PV Anlagen während der gesamten Lebensdauer realisiert werden. Eine gute Überwachung kann auch die Investitionen positiv beeinflussen indem durch Überwachung das Risiko minimiert wird und dadurch auch die generelle Wettbewerbsfähigkeit von PV im Energiesektor gesteigert wird.

Deshalb besteht die wesentliche Herausforderung für eine hohe Qualität der netzgekoppelten PV Systeme darin, dass alle wichtigen Parameter, welche die Anlageneistung während der Lebensdauer beeinflussen, quantitativ bestimmt werden.

Dabei müssen alle Fehler rasch erkannt und deren Auswirkungen bzgl. Energieproduktion und Einfluss auf die Stromgestehungskosten sofort sichtbar gemacht werden. Dies führt zu einer verbesserten Betriebsführung und Wartung von PV Anlagen und ein reduziertes Risiko für den Investor.

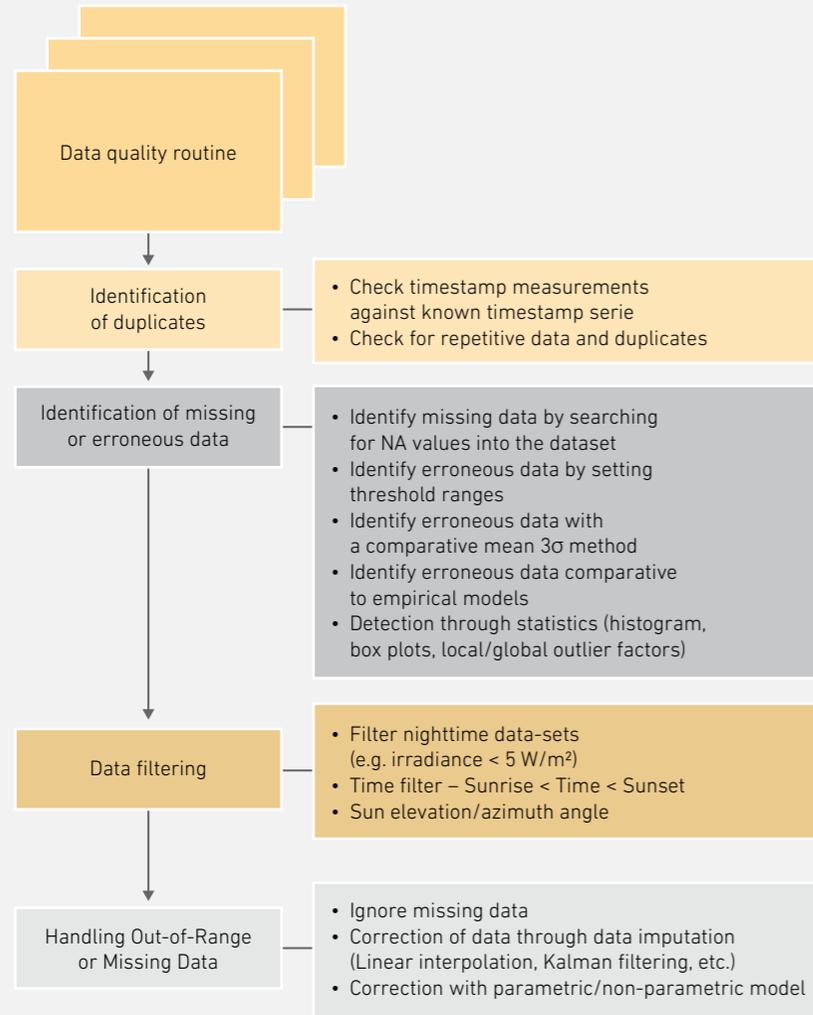
Die Notwendigkeit solcher Methoden ist auch an den Aktivitäten verschiedener internationaler Projektarbeitsgruppen sichtbar und stimmt mit den Zielen der Europäischen Solar initiative (SEII) bzgl. Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit überein.

Projekthalt

Die Definition, Entwicklung und Realisierung eines verbesserten und zuverlässigen PV Monitorings zur aktuellen Kraftwerksperformance ist das Ziel des Projekts IPERMON (Innovative Performance Monitoring System for Improved Reliability and Optimized Levelized Cost of Electricity). Durch dieses Konzept, welches auch die Definition der korrekten Sensorinstallation, Datenerfassung und Filterung und die entsprechende Analyse beinhaltet, können Algorithmen und Methoden für die sofortige Identifikation von Leistungsverlusten, Fehler und Degradationstrends im PV Kraftwerk entwickelt werden. Diese Methoden werden als Funktion in ein innovatives PV Monitoring System integriert, welches dadurch die Betriebsführung und Wartung von PV Kraftwerken wesentlich verbessert. Dabei überwacht das Monitoring System das PV Kraftwerk mittels neuartiger „data streaming“ Technologie in Echtzeit und verbessert dadurch die Identifikation von Verlusten und Trends in der Anlagenperformance.

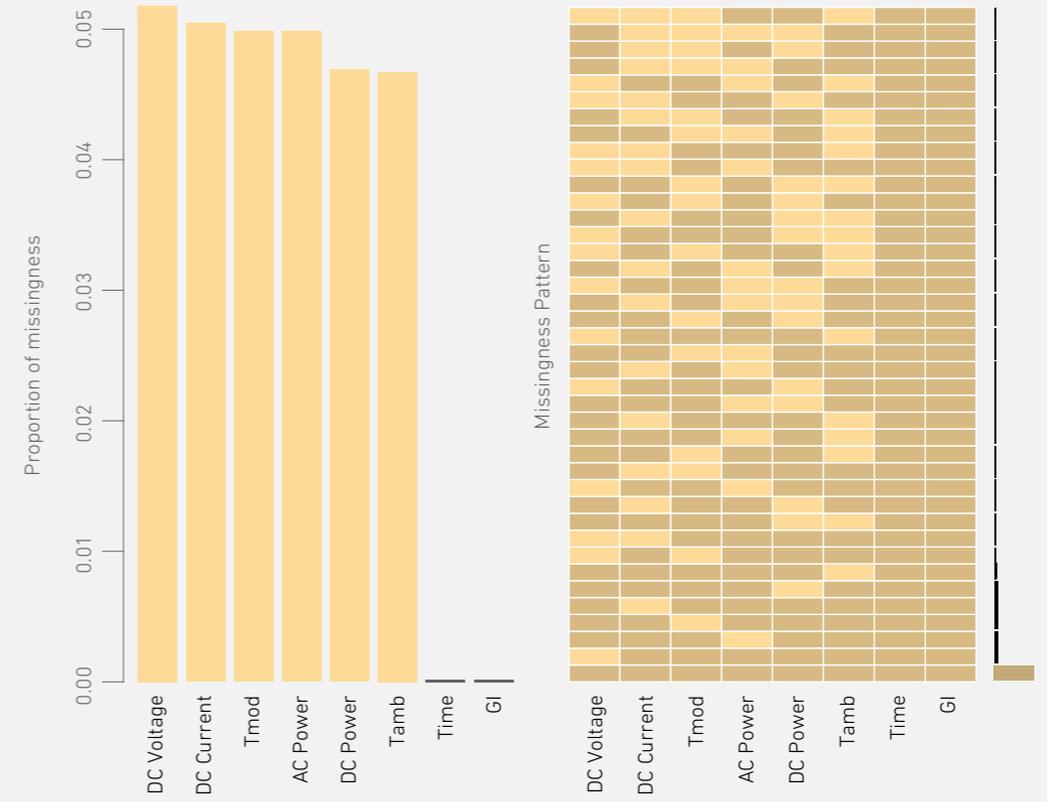
Innovative Datenqualitätsroutinen (Datenüberprüfung und -korrektur), um ein hohes Maß an Datenintegrität zu gewährleisten, was ein wesentlicher Bestandteil für die weitere Datenanalyse ist

ABBILDUNG 1



Routinen zur Erkennung fehlerhafter Daten und Sensordrifts zur reaktiven und proaktiven Wartung (Data Missingness Matrix)

ABBILDUNG 2



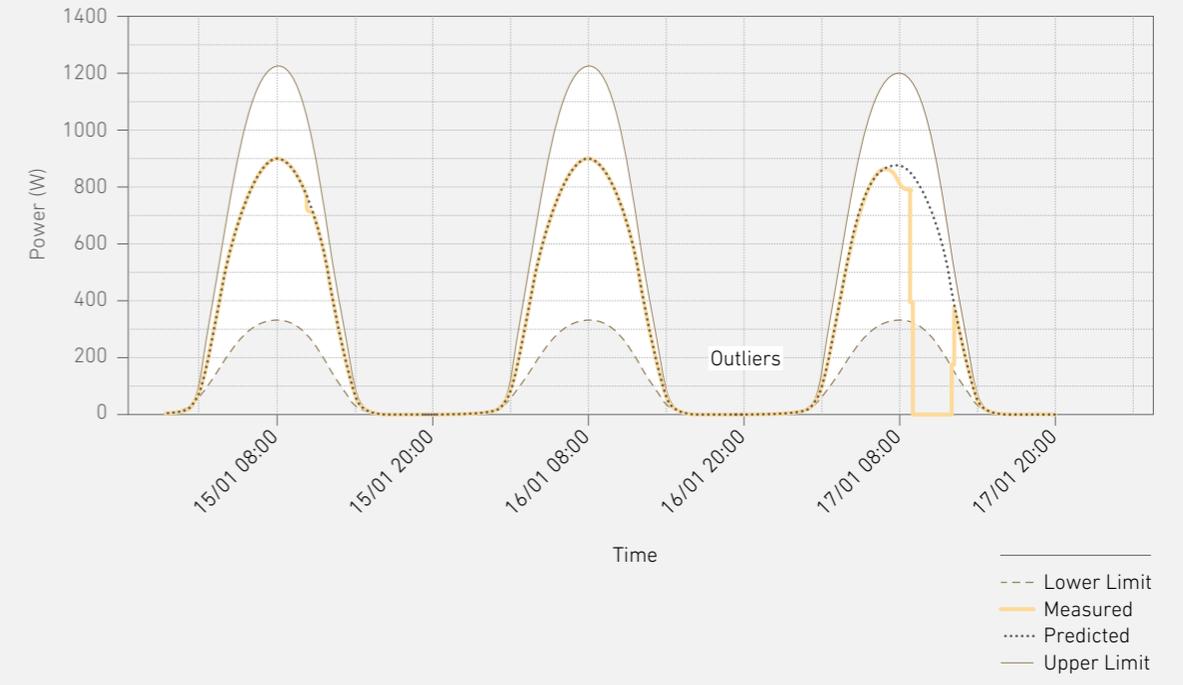
Detaillierte Verifizierung und Benchmarking von Fehlererkennungs- und Klassifizierungsereignissen an PV Test Systemen, der Forschungsanlage von Gantner Instruments und PV Grosskraftwerk

ABBILDUNG 3



Zustandsdetektor zur Quantifizierung der Leistung von PV-Kraftwerken auf Tagesbasis im Vergleich zu einem „digitalen Zwilling“ (mechanistisches Leistungsmodell von Gantner). Der Monitor kann häufig auftretende Ausfälle mit einer Genauigkeit von über 98 % erkennen und klassifizieren.

ABBILDUNG 4



Als Resultat vom Projekt IPERMON ist eine robuste und präzise Plattform verfügbar, welche Verluste berechnet, Fehler identifiziert und gleichzeitig Degradationstrends mit Hilfe statistischer Methoden noch genauer identifiziert. Dies ist das erste Mal, dass ein solches System verbesserte Funktionalitäten im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik zeigen wird. Gleichzeitig benötige die PV Industrie dringend solche automatisierten Methoden und Funktionen für die Performanceoptimierung um im wachsenden, aber sehr hart umkämpften Markt mit stetig sinkenden Margen bestehen zu können.

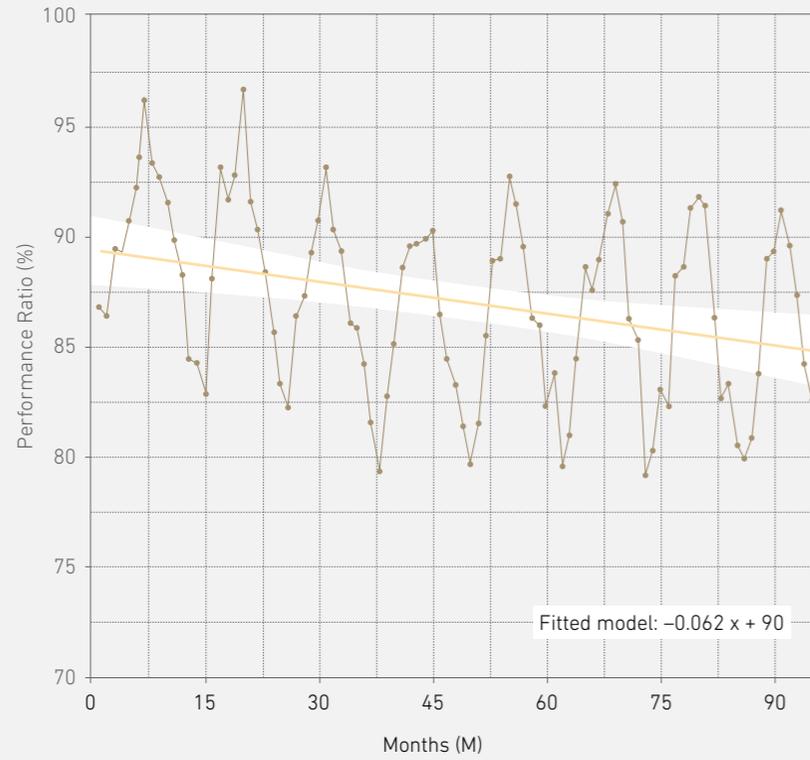
Das Projekt wird länderübergreifend zwischen einem führenden Industriepartner, Gantner Instruments (GI) und der Universität Zypern (UCY) durchgeführt. GI stellt dabei seine bestehende Plattform für die PV Messdatenerfassung zur Verfügung und das Knowhow der Datenerfassung von großen Kraftwerken. Die UCY hat im Bereich der Langzeitanalysen von PV Kraftwerken eine starke internationale Reputation und auch den notwendigen „track record“. Die Fähigkeiten beider Partner sind sowohl komplementär als auch ausgewogen und erlauben deshalb eine effiziente Zielerreichung und Umsetzung der Ergebnisse in ein



„Das Projekt IPERMON unterstützt die Klimaziele und Ambitionen beider Länder im PV Bereich als auch die Wettbewerbsfähigkeit im internationalen erneuerbaren Energieerzeugungsmarkt, da wir wissenschaftliche Erkenntnisse in industrielle PV Monitoring Services integriert haben.“ PROJEKTLEITER JÜRGEN SUTTERLÜTI

Genauere Berechnung der Leistungsdegradation der Anlagen unter Verwendung aller gängigen zeitreihenanalytischen und statistischen Techniken (OLS, ARIMA, CSD und YoY)

ABBILDUNG 5



kommerzielles Produkt. Dabei werden die Ziele und Ambitionen beider Länder im PV Bereich unterstützt als auch die Wettbewerbsfähigkeit des europäischen Industriepartners erhöht.

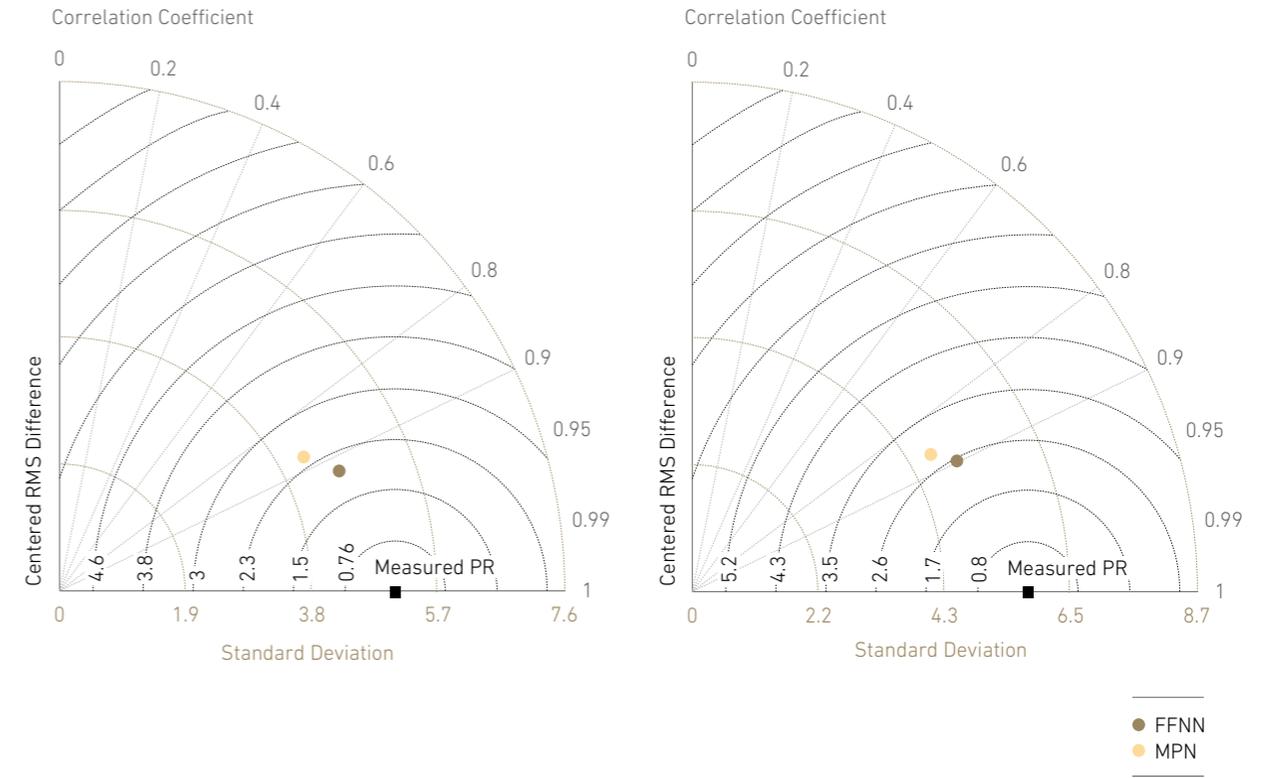
Für die Optimierung der Betriebsführung und Wartung als auch für die Maximierung der PV Energieproduktion ist eine vollständige Datenerfassung von Sensoren und allen elektrischen Parametern mit einer ausreichend hohen Datenaufösung (Sekundenintervall) notwendig.

Die sofortige Datenverarbeitung und Berechnungen erfordern neuartige Datenbank- und Analysekonzepte als auch eine performante Plattform, welche diese Funktionen und Analysen zuverlässig durchführt. Dieses „real time data streaming backend“ wird in Echtzeit die wesentlichen Leistungsverluste berechnen und gleichzeitig separieren. Daraus ist eine genauere Quantifizierung der aktuellen PV Leistung möglich und auftretende Fehler werden frühzeitig erkannt und die Verluste werden im Kraftwerkssystem lokalisiert. Dies ermöglicht neuartig die Analyse von Trends



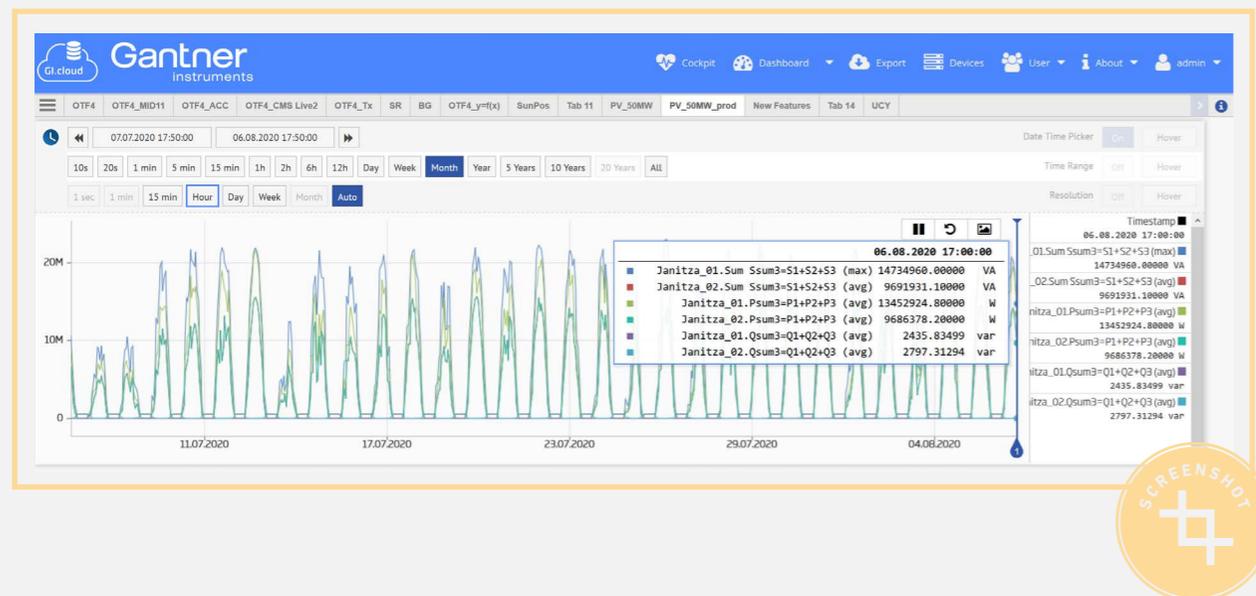
Benchmarking der Vorhersagegenauigkeit des maschinellen Lernens und des mechanistischen Leistungsmodells. Das Taylor-Diagramm zeigt, dass beide Modelle die Leistung von PV-Systemen genau vorhersagen können (Genauigkeitsfehler < 2 %).

ABBILDUNG 6



Integration in die GI.cloud-Plattform, um kommerzielle Dienste anzubieten (gi-cloud.io)

ABBILDUNG 7



wie z. B. der Langzeitdegradation von PV Modulen. Diese neuen Algorithmen und Funktionen erlauben die Qualität der PV Anlagen automatisch und zuverlässiger zu bestimmen was eine Optimierung der Energieproduktion ermöglicht und gleichzeitig einen wesentlichen Einfluss auf die gesamte PV Projektfinanzierung hat. Weiteres erlauben diese Parameter eine verbesserte Vorhersage der PV Produktion (day ahead) was ein wesentlicher Bestandteil für die effiziente und erfolgreiche Vermarktung von PV Energie ist.

Ergebnisse und Ausblick

Während der Projektlaufzeit wurden die Resultate, Routinen und Services entwickelt und mit realen Felddaten aus verschiedenen Regionen der Erde validiert. Kunden können diese Methode als Subskription Service auf gi-cloud.io benutzen.

Ausblick:

Dies ist das erste Mal, dass ein solches System verbesserte Funktionalitäten im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik zeigt. Gleichzeitig benötigt die PV Industrie dringend solche automatisierten Methoden und Funktionen für die Performanceoptimierung um im wachsenden, aber sehr hart umkämpften Markt mit stetig sinkenden Margen bestehen zu können. In Folgeprojekten wird die Plattform für Smart Grid Integration und deren nötige Services erweitert. Damit können die entwickelten Methoden auch für Energiespeicher und Verbraucher angewendet werden.



Referenzen

Die folgende Liste fasst die aus dem Projekt hervorgegangenen Publikationen und Präsentationen zusammen:

- J. Sutterlueti, "Advanced PV performance analysis on modules and power plants using cloud-based processing" in 12th PV Performance Modeling and Monitoring Workshop, May 2019.
- A. Livera, G. Makrides, M. Theristis, G. E. Georghiu, "Recent advances in failure diagnosis techniques based on performance data analysis for grid-connected photovoltaic systems" Renewable Energy. vol. 133, pp. 126–133, Apr 2019.
- A. Livera, M. Theristis, G. Makrides, J. Sutterlueti, S. Ransome and G. E. Georghiu, "Performance analysis of mechanistic and machine learning models for photovoltaic energy yield prediction", in 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2019, pp 1–6.
- A. Livera, G. Makrides, M. Theristis, J. Sutterlueti and G. E. Georghiu, "Advanced Diagnostic Approach of Failures for Grid-connected PV Systems", in 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2018, pp 1548–1553.
- A. Livera, M. Theristis, G. Makrides and G. E. Georghiu, "On-line Failure Diagnosis of Grid-Connected Photovoltaic Systems based on Fuzzy Logic", in 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018), 2018, pp 1–6.
- A. Livera, G. Makrides, J. Sutterlueti and G. E. Georghiu, "Advanced failure detection algorithms and performance outlier decision classification for grid-connected PV systems", in 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2017, pp 2358–2363.
- A. Livera, A. Phinikarides, G. Makrides and G. E. Georghiu, "Impact of missing data on the estimation of photovoltaic system degradation rate", in 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2017, pp 1954–1958.
- G. Makrides, A. Phinikarides, J. Sutterlueti, S. Ransome and G. E. Georghiu, "Advanced performance monitoring system for improved reliability and optimized leveled cost of electricity", in 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2016, pp 1973–1977.

Zusätzlich zu den Veröffentlichungen in Zeitschriften und auf Konferenzen wurden die Arbeiten zur Entwicklung der ausgefeilten Fehlererkennungsrouitinen, der Bestimmung der Degradationsrate und der genauen Vorhersagemethoden an die Mitglieder des Technischen Ausschusses der IEC, des NREL und der gemeinsamen VPVS-Aufgabe 13 der IEA weitergeleitet.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

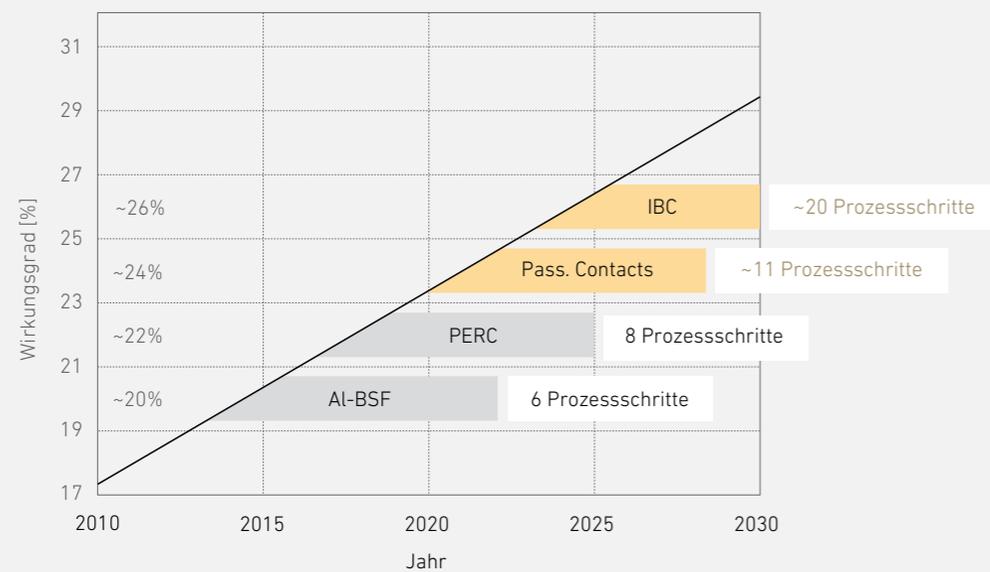
- PV Anlagen Monitoring von Kraftwerken ist die „Risiko-Versicherung“ für Eigentümer und Investoren.
- Durch strukturierte und intelligente Analysen können Probleme und unentdeckte Optimierungspotentiale vom Betreiber selbst visualisiert und identifiziert werden.
- Die Kombination der Messdaten mit dem digitalen Anlagen-Zwilling ermöglicht dem Anlagenbetreiber eine effiziente Betriebsführung.





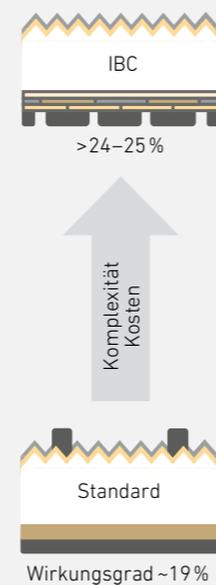
Projektleitung: HARALD STÜGER
Technische Universität Graz, Institut für Anorganische Chemie

Zusammenhang von Wirkungsgrad, Komplexität und Herstellungskosten moderner Solarzellen



Fortschritt der Zelltechnologie erhöht Komplexität und Kosten des Gesamtprozesses

ABBILDUNG 1



LiquidSi 2.0

Liquid phase deposition of Functional Silicon Layers for Cost-Effective High Efficiency Solar Cells

Einleitung / Motivation

Bedingt durch die Verknappung der Ressourcen an fossilen Brennstoffen und durch die umweltschädlichen Emissionen bei deren Verbrennung, bildet die Erschließung nachhaltiger erneuerbarer Energiequellen eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Mit der auf der Erde auftreffenden Menge an Sonnenenergie steht in diesem Zusammenhang ein nahezu unerschöpfliches Reservoir zur Verfügung, um auch in Zukunft den weltweit steigenden Energiebedarf abdecken zu können. Bislang bremsen allerdings vor allem die relativ hohen Energieentstehungskosten für photovoltaisch erzeugten Solarstrom den weiteren Vormarsch dieser Technologie. Nach einer Ankündigung der europäischen Plattform für photovoltaische Technologie müssen die Photovoltaikkosten in den nächsten Jahren um 30–50% gesenkt werden, um mit den derzeit üblichen Stromkosten konkurrenzfähig zu sein. Dafür ist allerdings zukünftig die Herstellung von Solarzellen mit deutlich erhöhter Effizienz bei gleichzeitig geringeren Produktionskosten notwendig.

Solarzellen aus kristallinem Silicium besitzen derzeit einen Marktanteil von >90%, was maßgeblich auf den langjährigen Erfahrungen mit der Siliciumtechnologie aus der Mikroelektronik basiert. Konventionelle Siliciumsolarzellen werden üblicherweise aus Siliciumwafern mit einer Dicke von 200–250 μm

hergestellt, wobei der Anteil der Waferkosten an den gesamten Herstellungskosten eines Solarmoduls bei etwa 45% liegt. Dünnschichtsolarzellen, die lediglich eine dünne (<50 μm) aktive Siliciumschicht auf einem billigen Trägermaterial wie Glas besitzen, sollten sich daher wesentlich günstiger produzieren lassen. Si-Dünnschichtsolarzellen haben deshalb das Potenzial, einen wichtigen Beitrag beim langfristig notwendigen Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung zu leisten.

Industriell produzierte Standardsolarzellen auf Si-Basis (BSF, back surface field) erreichen derzeit Wirkungsgrade von 17–20%. Allerdings evaluiert die Photovoltaikindustrie bereits mehrere alternative Zellkonzepte der nächsten Generation wie IBC (interdigitated back contacted) Zellen mit potenziellen Effizienzen von nahezu 25%. Ein Schlüsselschritt bei allen hocheffizienten Solarzellenkonzepten ist die gezielte Abscheidung hochdotierter Schichten oder Strukturen aus multikristallinem Silicium (mc-Si). Üblicherweise werden solche Schichten durch vakuumbasierte Abscheidetechniken wie z. B. CVD hergestellt. Nachfolgende Arbeitsschritte zur lithographischen Strukturierung solcher Schichten bedingen aber mit zunehmender Komplexität der Zellen signifikant aufwändiger werdende Prozeduren mit einem hohen apparativen und materiellen Aufwand (vergleiche Abbildung 1).

In diesem Zusammenhang stellt die Abscheidung von mc-Si Schichten aus flüssiger Phase (LPD, liquid phase deposition) eine kostengünstige und deutlich weniger komplexe Alternative dar. Verglichen mit dem momentanen Stand der Technik versprechen LPD basierte Verfahren eine deutlich einfachere Prozessführung, höhere Durchsatzraten und einen signifikant reduzierten Bedarf an Ausgangsmaterialien. Des Weiteren lassen sich LPD Prozesse unter Verwendung von geeigneten Druckverfahren hervorragend für die direkte großflächige Abscheidung von strukturierten Schichten nutzen, wodurch die oben erwähnten nachfolgenden Prozessschritte bei der Fabrikation der fertigen Devices vermieden werden (Abbildung 2).

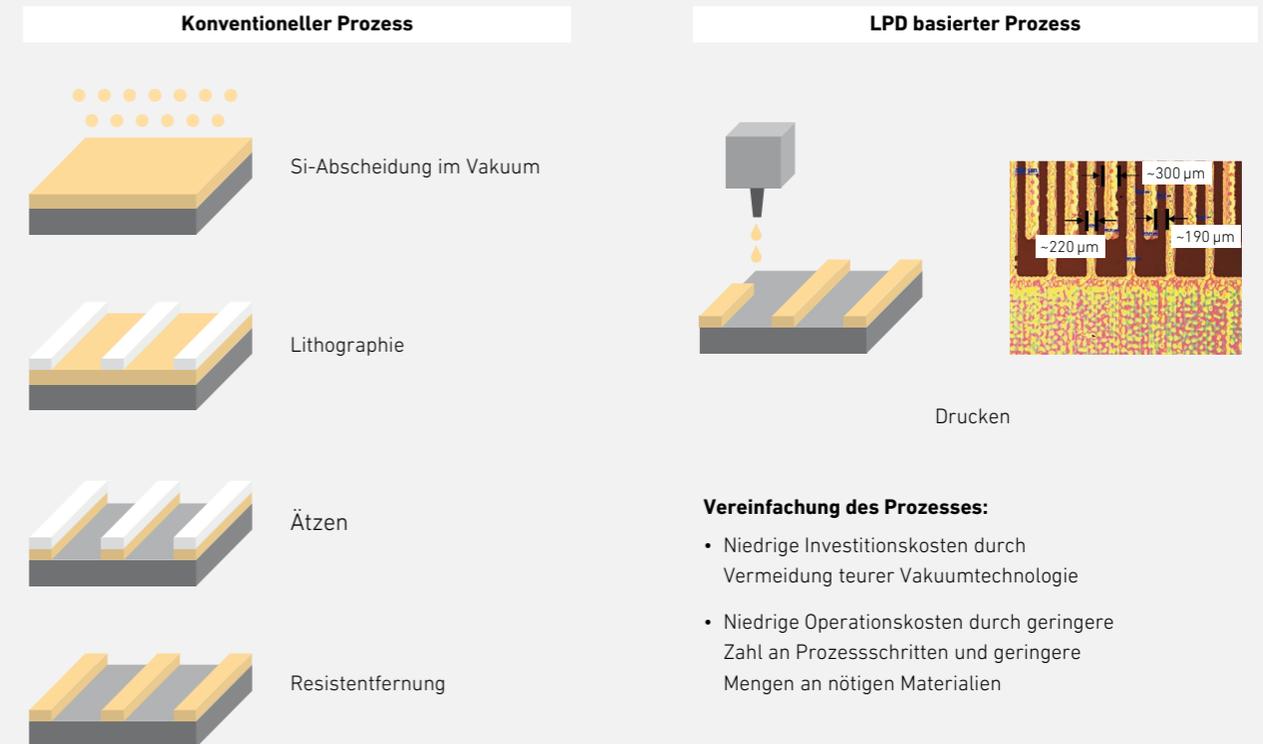
Die Abscheidung von mc-Si Schichten aus flüssiger Phase (vergleiche Abbildung 3) wurde bereits in der Literatur beschrieben. Dabei wurden geeignete Precursoren (molekulare höhere Siliciumwasserstoffe) unter genau definierten Bedingungen erwärmt oder mit UV-Licht bestrahlt. Die auf diesem Wege erhaltenen oligomeren (langkettigen) Siliciumwasserstoffe wurden anschließend in einem geeigneten Lösungsmittel gelöst und mit Hilfe geeigneter Beschichtungs-

techniken auf ein gewünschtes Substrat appliziert. Der gebildete Nassfilm lässt sich schließlich durch Erhitzen auf $>300\text{ °C}$ zu amorphem Silicium (a-Si) konvertieren und durch Laserbestrahlung oder einen weiteren Hochtemperaturschritt zu mc-Si kristallisieren. Ausgehend von Cyclopentasilan (Si_5H_{10} , CPS), Cyclohexasilan (Si_6H_{12} , CHS) oder Neopentasilan (Si_5H_{12} , NPS) wurden auf diese Weise erfolgreich mc-Si Schichten abgeschieden und auch bereits erfolgreich in Prototypen von Solarzellen mit Wirkungsgraden bis zu 20% getestet.

Trotz dieser sehr vielversprechenden Ausgangssituation besitzen die bisher verwendeten Precursoren einige Nachteile, die eine kosteneffiziente großtechnische Umsetzung des Gesamtprozesses bisher verhindert haben. So lassen sich CPS und CHS auf Grund der anzuwendenden komplexen und zeitaufwändigen Syntheseroute kaum im industriellen Maßstab herstellen. Die gegenwärtige Produktionskapazität für NPS mit bis zu 100 kg/Jahr ist zwar deutlich höher, hier schlagen allerdings die hohen Produktionskosten von mehreren 1000 €/kg sowie das Sicherheitsrisiko bei der Handhabung dieses an der Luft extrem selbstentzündlichen Stoffes ebenfalls negativ zu Buche.

Vergleich der Effizienz von konventionellen und LPD basierten Prozessen zur Siliciumabscheidung

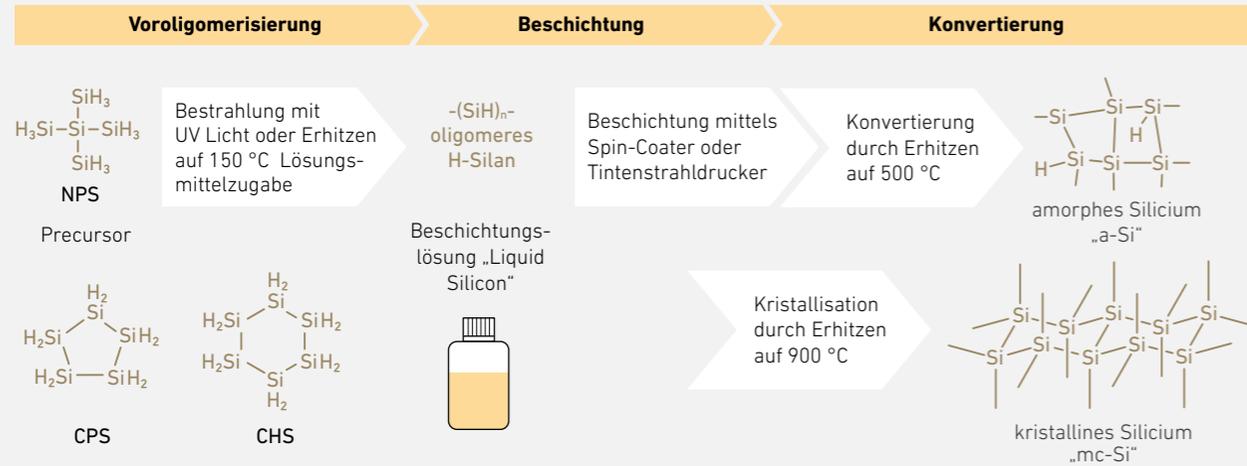
ABBILDUNG 2



„Ein Schlüsselschritt bei allen hocheffizienten Solarzellenkonzepten ist die gezielte Abscheidung hochdotierter Schichten oder Strukturen aus multikristallinem Silicium. Durch die breite Verfügbarkeit von hochinnovativen flüssigphasenprozessierten Solarmodulen mit hoher Effizienz lässt ein erfolgreicher Projektverlauf substantielle Beiträge zu dieser Thematik erwarten.“ PROJEKTLEITER HARALD STÜGER

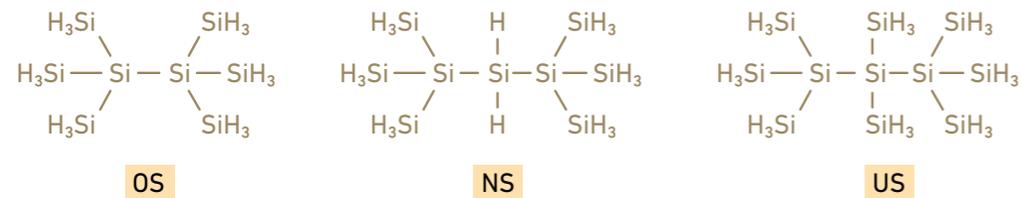
LPD Prozess zur Abscheidung von mc-Si

ABBILDUNG 3



„Liquid Silicon 2.0“ Zielprodukte

ABBILDUNG 4



Projekthinhalte und -verlauf

An dieser Stelle setzt das gegenständliche Projekt an, dessen primäres Ziel es ist, industriell gangbare Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von größeren Mengen an alternativen Precursorsystemen („Liquid Silicon 2.0“) zu entwickeln, um die Wettbewerbsfähigkeit des gesamten LPD-Prozesses zu erhöhen. Des Weiteren sollen im Projektverlauf aus den hergestellten Materialien Siliciumschichten abgeschieden, in Hinblick auf ihre Eignung für photovoltaische Anwendungen charakterisiert und wenn möglich in Prototypen kostengünstiger und hocheffizienter Photozellen getestet werden.

Die Anforderungen an die Eigenschaften der Zielsubstanzen waren dabei wie folgt definiert:

- die Stoffe sollten möglichst frei von Kohlenstoff und Sauerstoff sein, um die Si-Schichten nicht zu kontaminieren
- die Stoffe sollten möglichst hohe Siedepunkte besitzen, um ein Verdampfen bei der thermischen Oligomerisierung zu verhindern
- für viele Anwendungen (z. B. auf thermisch labilen Substraten) ist es vorteilhaft, den im LPD Prozess enthaltenen Voroligomerisierungsschritt photochemisch zu initiieren. Voraussetzung dafür ist eine möglichst langwellige Lichtabsorption des Precursors
- aus sicherheitstechnischen Gründen sollten die Stoffe an der Luft möglichst nicht spontan selbstentzündlich sein
- die Stoffe sollten möglichst kostengünstig aus kommerziell verfügbaren Edukten in industriellen Mengen herstellbar sein

Auf Basis von Literaturdaten und eigenen Vorerfahrungen waren exakt diese Eigenschaften für höhere Siliciumwasserstoffe der allgemeinen Zusammensetzung $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ mit $n \geq 8$ zu erwarten, die daher den primären Gegenstand unserer Studien darstellten.

Der dafür entwickelte Forschungsplan sah im Wesentlichen 3 Projektstufen vor:

- Entwicklung geeigneter Syntheserouten auf Basis von NPS
- Übertragung erfolgreicher Synthesen auf billigere und besser verfügbare Edukte wie SiH_4 , Si_2H_6 oder Si_3H_8
- Abscheidung und Charakterisierung von mc-Si Schichten mittels LPD und Einsatz in Prototypen hocheffizienter Solarzellen

Ausgewählte Resultate

Aus der Fachliteratur ist bekannt, dass der selbstentzündliche Charakter von Siliciumwasserstoffen beim Kontakt mit Luftsauerstoff mit steigendem Molekulargewicht kleiner wird und für Moleküle mit mehr als 7 Si-Atomen vollständig verschwindet. In gleicher Weise sollte auch der Siedepunkt mit steigender Molekülgröße ansteigen und die UV-Absorption in den langwelligen Bereich verschoben werden. Aus diesem Grund wurden von uns Synthesewege zur gezielten Darstellung von solchen Stoffen gesucht. Ausgehend von NPS konnten dabei die bisher völlig unbekanntesten verzweigten Poly-H-Silane $\text{Si}_8\text{H}_{18}(\text{OS})$, $\text{Si}_9\text{H}_{20}(\text{NS})$ und $\text{Si}_{11}\text{H}_{24}(\text{US})$ (Abbildung 4) durch vollkommen neuartige Syntheseverfahren hergestellt werden.

Im Verlauf unserer Studien konnten wir zeigen, dass sich NPS sowohl basen- als auch säureinduziert gezielt zu höheren Oligomeren umlagern lässt. Abbildung 5 zeigt den von uns auf dieser Basis entwickelten Weg zur Synthese von OS, NS und US. OS und US entstanden dabei mit überraschend hoher Selektivität bei der Reaktion von NPS mit dem basischen Reagenz Methyllithium und der nachfolgenden Behandlung des dabei gebildeten Metallsilanides mit geeigneten Halogenverbindungen. Im Gegensatz dazu ergab die Umsetzung von NPS mit Lewis-Säuren wie

Gezielte Synthese von OS, NS und US

ABBILDUNG 5

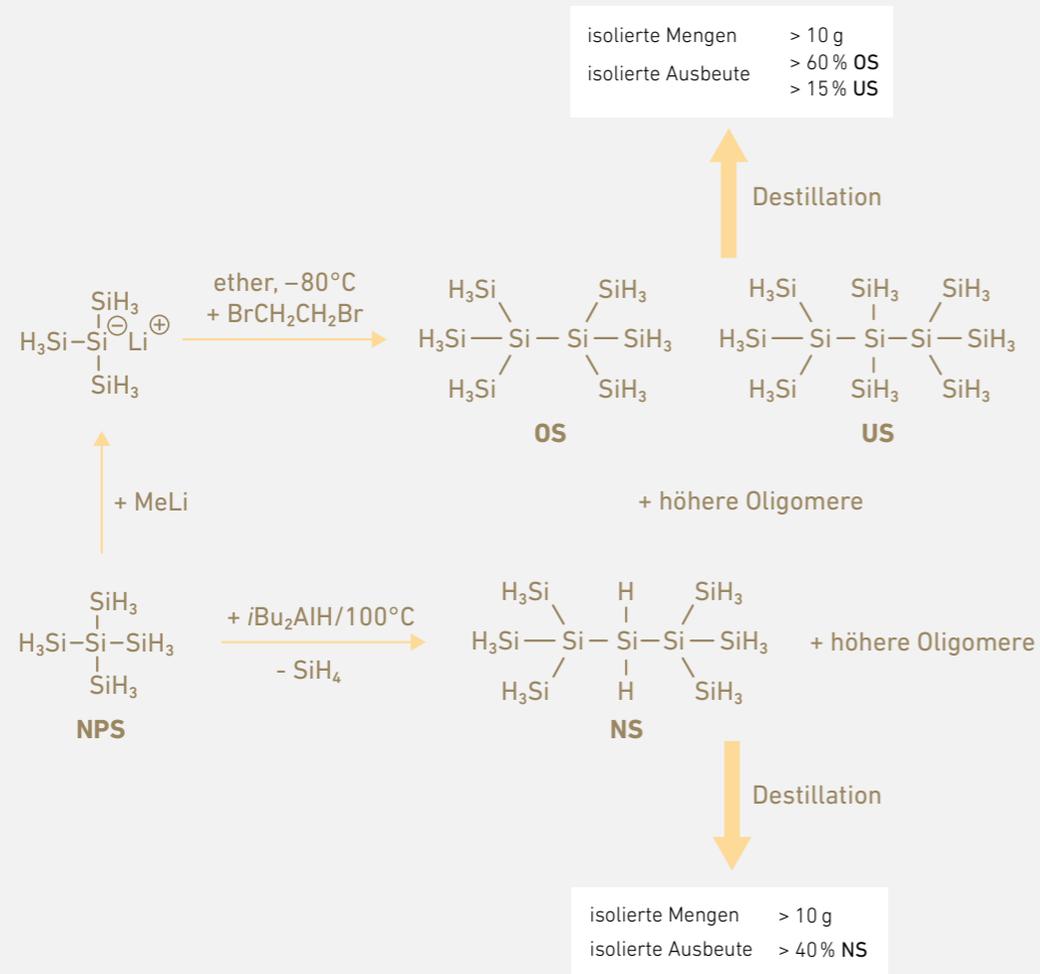
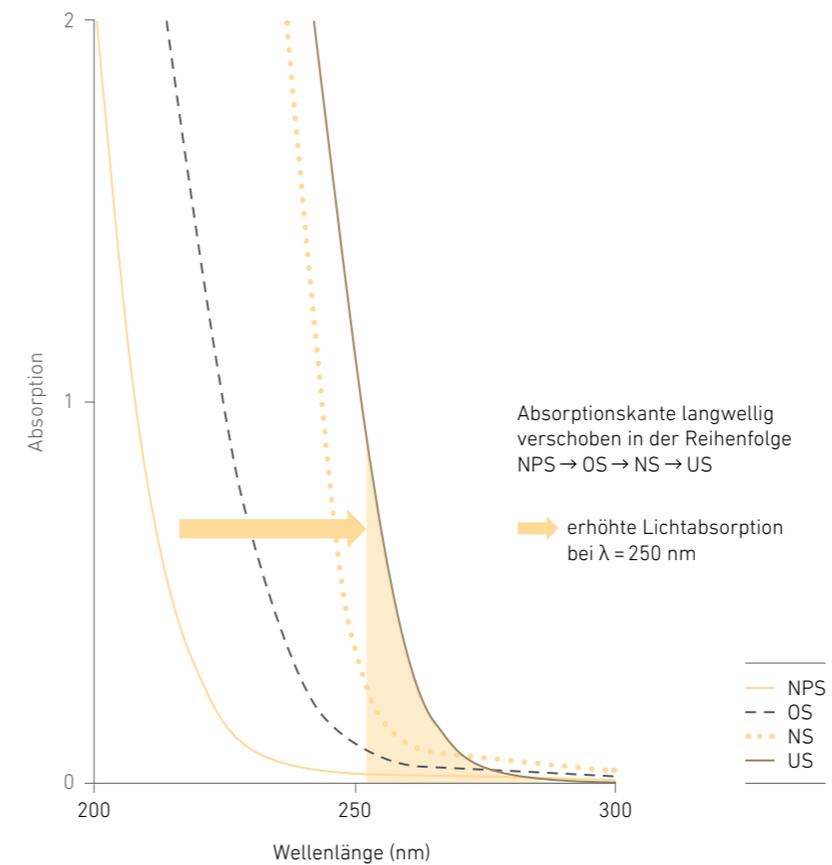
UV-Vis Absorptionsspektren von NPS, OS, NS and US (n-Hexan, $c = 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

ABBILDUNG 6

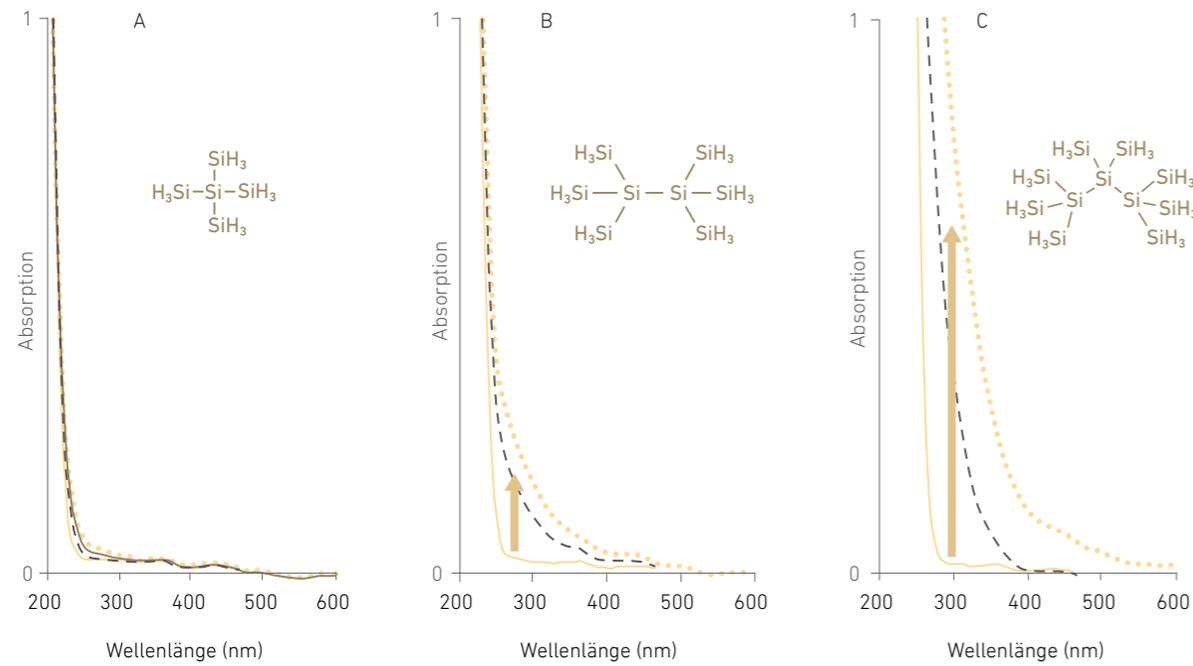


$i\text{Bu}_2\text{AlH}$ bevorzugt NS. Nach Auftrennung der jeweiligen Rohproduktgemische durch einfache Destillation erlaubt unsere Methode im Labormaßstab die weitgehend effiziente Herstellung der Zielverbindungen in Mengen von > 10 g, was weiterführende Studien in Hinblick auf einen Einsatz als Precursoren für die Siliciumabscheidung ermöglichte.

Die projektrelevanten Eigenschaften der von uns hergestellten neuartigen Materialien sind äußerst vielversprechend. Die Stoffe sind Flüssigkeiten mit hohen Siedepunkten und entzünden sich bei Kontakt mit der Atmosphäre nicht mehr spontan. Erwartungsgemäß zeigen UV-spektroskopische Studien relativ zu NPS signifikant langwellig verschobene Absorptionseigenschaften für OS, NS und US (Abbildung 6).

Absorptionsspektren von NPS, OS und US vor und nach Bestrahlung bei $\lambda = 254 \text{ nm}$ und 6 W (n-Hexan, $c = 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

ABBILDUNG 7



- das Absorptionsspektrum von NPS ändert sich bei Bestrahlung kaum
- bei OS und US steigt die Absorption im langwelligen Bereich
- ➔ OS und US oligomerisieren wesentlich effektiver

— 0 min
 - - - 10 min
 ···· 30 min
 - · - · 70 min

Thermogravimetriedaten von CPS, NS, OS und einem aus OS hergestellten verzweigten H-Silan-Oligomers (oligo-OS)

TABELLE 1

Verbindung	Zersetzungstemperatur (°C)	Masseverlust (%)
CPS	110–355	39
OS	127–174	79
NS	149–202	81
oligo-OS	60–325	51

Die daraus resultierende erhöhte Lichtabsorption bei Wellenlängen $>250 \text{ nm}$ bewirkt eine wesentlich effizientere Photooligomerisierung evident durch die zunehmende Lichtabsorption bei Bestrahlung im langwelligen Bereich (Abbildung 7A–C). Dies bedeutet in Hinblick auf den in LPD-Verfahren zur Siliziumabscheidung enthaltenen Schritt zur Voroligomerisierung des Precursors eine beträchtliche Verbesserung des Standes der Technik.

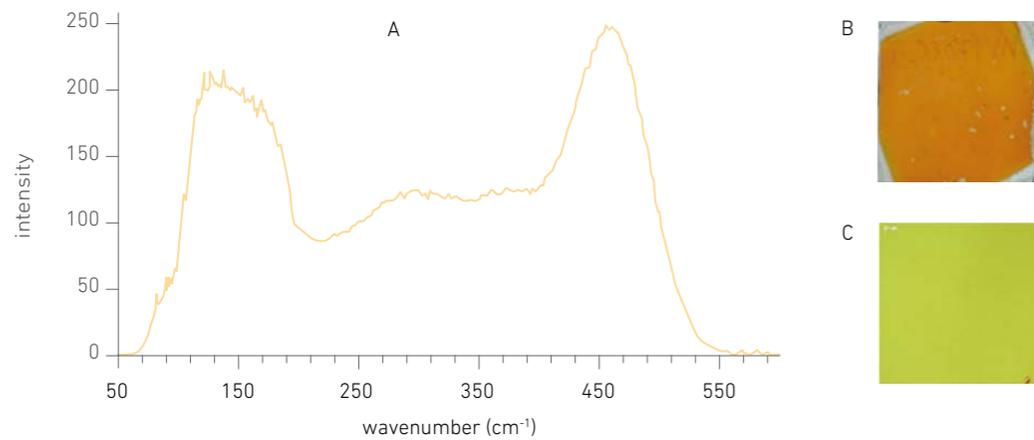
Um die im Verlauf der Siliciumabscheidung aus flüssiger Phase ablaufenden Prozesse besser verstehen und optimieren zu können, wurden die in diesem Projekt erstmals hergestellten Precursormoleküle NS und OS thermogravimetrisch untersucht. Verglichen mit Cyclopentasilan (CPS) zeigen die erhaltenen Thermogravimetriedaten (Tabelle 1) deutlich höhere

Zersetzungstemperaturen sowie signifikant geringere keramische Ausbeuten. Werden NS und OS jedoch vor der Analyse photochemisch voroligomerisiert (oligo-OS in Tabelle 1), steigt die keramische Ausbeute auf $>50\%$ an, was in etwa dem Wert des derzeitigen Standes der Technik entspricht.

Ausgehend von OS ist es außerdem gelungen, mittels spin-coating erste Siliciumschichten auf Glassubstraten abzuscheiden (vgl. Abbildung 8). Die dabei gebildeten Filme sind homogen aufgebaut, etwa 150 nm dick und zeigen eine für a-Si Filme typische gelb-orange Färbung. Die Ramanspektren dieser Schichten sind charakteristisch für amorphes Silizium, gemessene Fotoleitfähigkeiten von etwa $5 \cdot 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ liegen im Bereich ähnlicher mittels LPD-Verfahren abgechiedener Produkte.

Ramanspektrum (A), Foto (B) und Mikroskopaufnahme (C)
eines aus OS produzierten a-SiH Films

ABBILDUNG 8



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bereits auf Basis der im vorangehenden Abschnitt enthaltenen Resultate die prinzipielle Gültigkeit des zu Grunde liegenden Forschungsansatzes bewiesen werden konnte. So ist es gelungen, die in *Abbildung 4* gezeigten Zielverbindungen gezielt auf einfache Weise in Grammengen herzustellen und zur Abscheidung von mc-Si-Schichten zu verwenden. **Wie im Projektantrag postuliert zeigen diese Stoffe im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik deutlich verbesserte Eigenschaften.** Weitere Studien zur Synthese dieser

Precursoren aus dem leichter und billiger verfügbaren SiH_4 und deren Verwendung in der Solarzellentechnologie zeigen ebenfalls bereits sehr zufriedenstellende Ergebnisse, können aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt aus patentrechtlichen Gründen noch nicht offengelegt werden. Bis zum Abschluss des Projektes sind somit substantielle Beiträge zur kostengünstigen und breiten Verfügbarkeit von hochinnovativen flüssigphasenprozessierten Solarmodulen mit hoher Effizienz und somit auch zu den Programmzielen der SOLAR-ERA.NET Initiative zu erwarten.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Die Erschließung nachhaltiger erneuerbarer Energiequellen ist eine der großen Herausforderung unserer Zeit.
- Hohe Energieentstehungskosten für photovoltaisch erzeugten Solarstrom behindern den weiteren Vormarsch dieser Technologie.
- Einfachere und kostengünstigere Produktionsverfahren für Si-basierte Solarzellen besitzen großes Potenzial zur Lösung dieser Probleme.

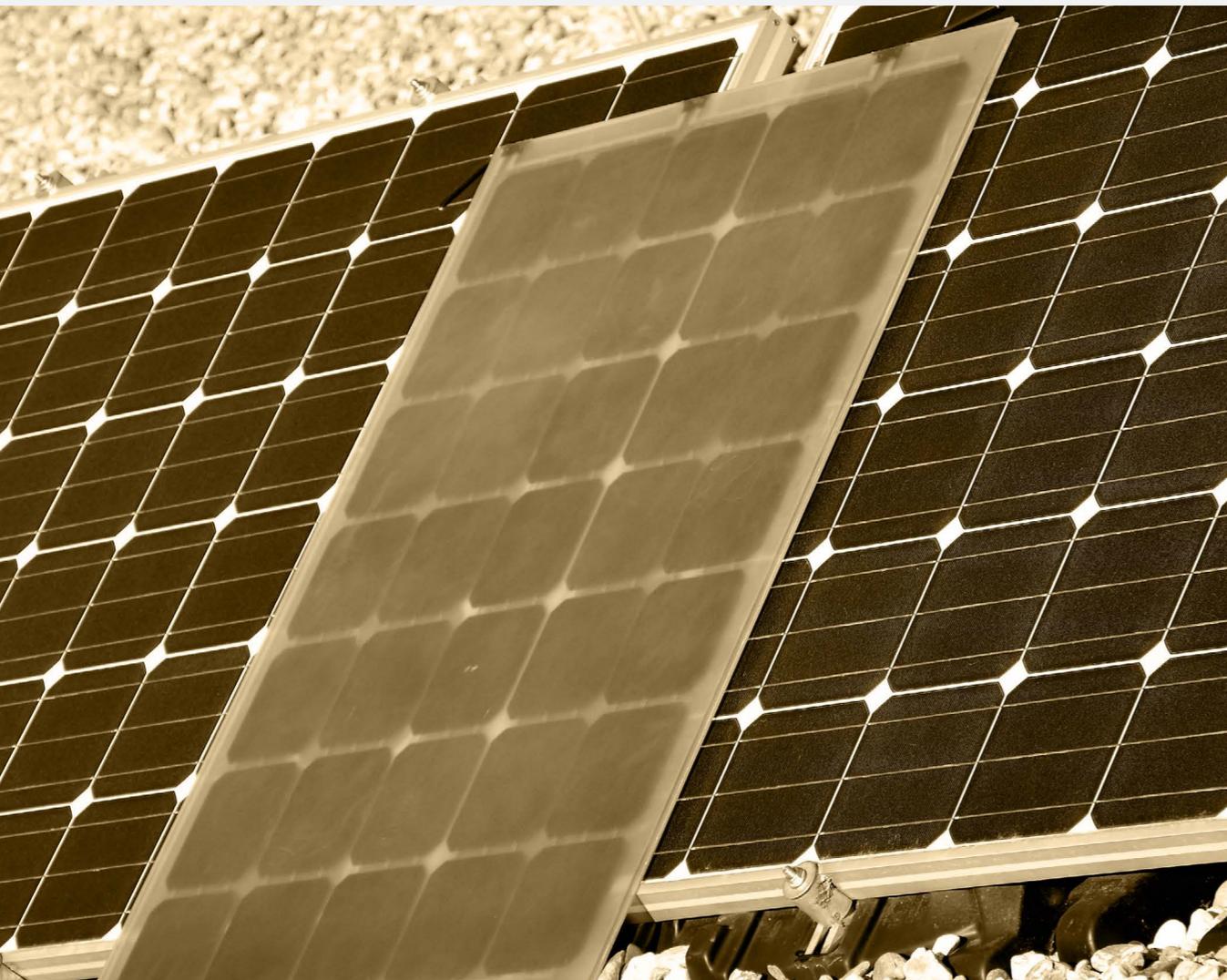




Projektleitung: ROMAN TRATTNIG
Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH

**Prototyp eines PV-Moduls mit beschichtetem Deckglas
im Vergleich mit Standardmodulen**

ABBILDUNG 1



Cover Power

Smart Glass Coatings for Innovative BiPV Solutions

Ausgangssituation

In Europa befindet sich die Integration der Photovoltaik (PV) in Gebäude nach wie vor in einer ambivalenten Situation: Während Gebäude bereits das am stärksten genutzte Flächenpotential für PV Installationen darstellen, sind beispielsweise nur ein kleiner Anteil von 2,4% davon gebäudeintegriert ausgeführt. [1] Die große Masse der PV-Anlagen sind als Aufdachmontage ausgeführt. Die Ursache dafür kann vor allem in der bisherigen zeitlichen Entwicklung gefunden werden. Während Aufdachanlagen in diesem Zusammenhang wichtiger Wegbereiter für die flächendeckende Einführung der Technologie waren, so überzeugt ihre Anwendung in Ballungsräumen aber weder mit ihrer Ästhetik noch vom ökologischen Standpunkt aus. Dennoch ist die Nutzung von Gebäuden als Träger für PV-Anlagen nötig, um das Ziel von 100% Energiegewinnung aus erneuerbaren Energiequellen zu erreichen und gleichzeitig eine zusätzliche, durch solare Stromerzeugung induzierte, Flächenversiegelung zu vermeiden. Auch wenn innovative Solargebäude bereits demonstrieren, dass sie bei hoher Ausschöpfung des Solarpotentials in der Jahresbilanz zu voll versorgten Solargebäuden führen können, bleibt die bauwerksintegrierte Photovoltaik bis heute weit unter ihren technischen und energetischen Möglichkeiten. Das tatsächliche Potential von bauwerkintegrierter Photovoltaik (BiPV) wurde für Österreich beispielsweise

durch die Technologieplattform Photovoltaik TPPV bereits 2016 in der „Photovoltaik Roadmap für Österreich“ aufgezeigt. [2] Die darin präsentierten Zahlen und Fakten demonstrieren dabei nicht nur das große Marktpotenzial der bauwerkintegrierten Photovoltaik, sondern auch die Größe der Herausforderung die ihre Implementierung mit sich bringt und führen zu dem Schluss, dass für das Erreichen des Ziels von 100% Energie aus erneuerbaren Energiequellen nahezu alle besonnten und baulich geeigneten Dach- und Fassadenflächen benötigt werden, um die gewünschten Solarstrommengen zu erzeugen.

Im regulativen Umfeld schreibt die EU-Gebäuderichtlinie seit Ende 2018 vor, dass alle neuen Gebäude in Europa bis zum 31. Dezember 2020 nahezu Nullenergiegebäude sein müssen (öffentliche Gebäude bereits seit 31. Dezember 2018). [3-4] Folglich ist also zu erwarten, dass zum heutigen Zeitpunkt die Mehrheit der neu errichteten Gebäude in Europa erhebliche Mengen an photovoltaischer Elektrizität erzeugen. Eine entsprechende Umsetzung in Form von BiPV Lösungen scheitert aber aktuell noch an mehreren, wesentlichen Punkten. Ein sehr wichtiges Argument dabei, welches vor allem Architekten oder Bauherren immer wieder zutreffend ins Feld führen, bezieht sich bei dabei auf die beschränkte Ästhetik von Standardmodulen sowie auf die verringerte Effizienz von

farbigen PV-Fassaden im Vergleich zu Standardlösungen. Basierend darauf sind die Schlüsselbedürfnisse für BiPV auch ausdrücklich schon seit 2013 im SET-Plan der Solar Europe Industry Initiative festgehalten: [5]

- Flexibilität des Designs und verbesserte Ästhetik,
- Optimierung der Leistung und verbessertes optisches Erscheinungsbild bei reduzierten Kosten und
- Industrielles kostengünstiges Herstellungsverfahren zur Herstellung von BiPV-Produkten mit maßgeschneidertem Design.

Das Projekt Cover Power setzt gerade an diesen Herausforderungen an und beschäftigt sich zum einen intensiv mit dem ästhetischen Erscheinungsbild von gebäudeintegrierten Solarmodulen, aber auch mit der Umsetzung ökonomisch sinnhafter industrieller Prozesse für die Produktion von farbigen Solarmodulen.

Herausforderung und Lösungsansatz

Bei der Analyse der Gründe für das optische Erscheinungsbild der Photovoltaik wird deutlich, dass der optische Eindruck überwiegend durch das Deckglas bestimmt wird. Insbesondere die Reflexionen am Deckglas sind wesentlich höher (mehr als doppelt so hoch) als diese an der darunterliegenden Solarzelle. Aus diesem Grund ist der Ansatz vielversprechend, für die Farbgebung das Deckglas in Angriff zu nehmen, also jene Komponente die hauptsächlich für das Design verantwortlich ist. Dabei existieren verschiedene Ansätze, um die Anforderungen an ästhetisch anspruchsvolle Solarmodule zu erfüllen. Eine davon ist das Bedrucken der Innenseite von Moduldeckgläsern mit Farbpigmenten. Während dieser Zugang in erster Linie den Schutz der Module vor Zuverlässigkeitsproblemen und vor Abrieb der verwendeten Farbe gewährleistet, führt er gleichzeitig zu einem Effizienzverlust von bis zu 50% für das Solarmodul, wenn klare und helle Farben realisiert werden sollen. [6] Darüber hinaus führt die direkte Reflexion an der Glasaußenseite zur Blendung,

ein Problem, das sich für einige fassadenintegrierte BiPV-Projekte als bedeutendes Hindernis erwies. Im Gegensatz dazu wurden in letzter Zeit mehrere Druckfarben und Beschichtungstechnologien zur Abdeckung der Außenseite von Glas verfügbar. Diese Farben und Verfahren werden im Baugewerbe bereits verwendet, kommen bei BiPV-Anwendungen aber fast nicht zum Einsatz.

Das Projekt Cover Power konzentriert sich genau auf diese Farbgebung an der Modulaußenseite, welche somit die Schlüsseltechnologien für das Projekt darstellen. Eine Kombination verschiedener Arten von Beschichtungen werden hierbei zum Einsatz gebracht, um die angestrebten Ergebnisse in Bezug auf optisches Erscheinungsbild, Blendung und Glanzreduzierung zu erreichen. Designbeschichtungen auf der Außenseite von PV-Modulen sind hierbei eine deutliche Innovation und die erwarteten Projektergebnisse ermöglichen neue Freiheitsgrade beim Design innovativer BiPV Lösungen.

Die Technologien

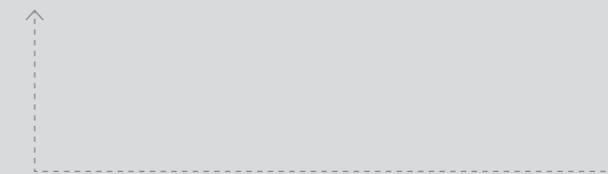
Im Laufe von Cover Power werden verschiedene Glasbeschichtungstechnologien untersucht:

- Tintenstrahldruck von keramischen Farben: Diese Technologie beruht auf digital aufgedruckten Farben, die während eines Härte- oder Glühprozesses in das Glas eingeschmolzen werden. Durch den digitalen Druck können lebendige Designs erstellt werden und die Technologie wird bereits in der Glasindustrie angewandt.
- Sol-Gel-Sprühbeschichtung: Diese Beschichtungstechnologie, mit der sich das ästhetische Erscheinungsbild (Farbe und Textur) von Gläsern abstimmen lässt, basiert auf einem Sol-Gel-Verfahren, das auch für Antireflexbeschichtungen von PV-Modulen verwendet wird: Durch Mischen der Sol-Gel-Lösung mit anorganischen Pigmenten und Aufsprühen der Suspension auf Glassubstrate kann in einem Temper-Schritt eine Einfärbung



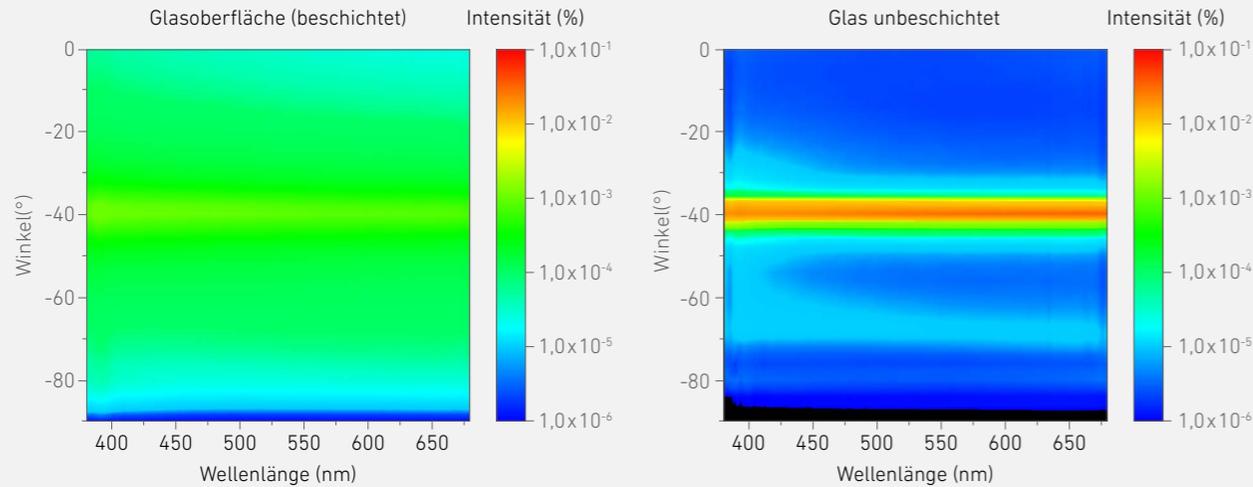
„Das Projekt Cover Power erweitert die effizienzorientierte Entwicklung von innovativen Solarmodulen um eine konzentrierte Betrachtung des ästhetischen Erscheinungsbildes. Damit wird die optische Wahrnehmung, wie Farbeindruck und Reduktion der Blendung, ebenso mit einbezogen wie die Effizienz des photovoltaischen Systems. Komplettiert wird dies durch die Adaption von im industriellen Umfeld bereits eingesetzten, ökonomisch sinnvollen Fertigungsprozessen. Im hervorragenden Zusammenspiel von F&E und Industrieunternehmen wird damit die Grundlage für innovative BiPV Lösungen geschaffen, die neue Freiheitsgrade in Bezug auf ihr Design bieten.“

PROJEKTLEITER ROMAN TRATTNIG



Vergleich der winkelaufgelösten Reflexion eines beschichteten (links) und eines unbeschichteten Deckglases (rechts)

ABBILDUNG 2



und Texturierung der Oberfläche erreicht werden. Nach dem Vorspannen sind die Pigmente fest mit der Glasoberfläche verbunden.

- Beschichtung auf Basis der Starshine®-Technologie: Diese im Fassadenbau bereits eingesetzte Technologie basiert auf einem Beschichtungsprozess von Gläsern mit (z. B. farbigem) Glasgranulat. Die resultierende Glasoberfläche ist stark strukturiert und die realisierten Fassaden haben ein sehr lebendiges Erscheinungsbild.

Die genannten Beschichtungsmethoden weisen unterschiedliche Stärken und Schwächen in Bezug auf Gestaltungsfreiheit und Leistungsverluste auf. Im Rahmen des Projektes Cover Power werden daher alle aufgeführten Beschichtungstechnologien daraufhin untersucht, welche Technologie oder Verfahrenskombination am ehesten geeignet ist, die angestrebten Ergebnisse zu erreichen. Zur Evaluierung ihrer Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit werden Testmuster und Modulprototypen hergestellt und sorgfältig charakterisiert. Darüber hinaus werden die am Projekt beteiligten Designer die Muster und Prototypen auf ihre Eignung für die Erstellung innovativer Designs untersuchen. Schließlich werden die praktikabelsten Lösungen angewandt, um eine Prototyp-Testfassade zu schaffen, die überwacht wird und als Referenzanlage für die im Projekt entwickelten innovativen Lösungen dienen soll.

Die Projektziele

Kurz zusammengefasst besteht das Ergebnis der im Projekt geplanten Aktivitäten darin, Technologien zu kombinieren, deren Machbarkeit in den relevanten Umgebungen (Konstruktion und Gebäude) nachgewiesen ist, und den Prototyp eines BiPV-Systems mit innovativem Design, ansprechender Effizienz, minimaler Blendung und hoher Zuverlässigkeit zu realisieren. Konkret ist damit das Ziel des Projekts die Entwicklung von BiPV-Modul-Prototypen auf der Basis von Glas-Glas-PV Modulen und Siliziumsolarzellen

durch das Aufbringen neuartiger Glasbeschichtungen für die Außenseite (Umweltseite) der Deckgläser.

Diese Modulprototypen sollen die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Flexibles und innovatives Design in Bezug auf Farbe und Oberflächentextur
- Minimale Blendung (weniger als 0,1 % direkte Reflexion)
- Eine maximale Leistung von mindestens 150 Wp/m^2 (STC) durch Ausnutzung von rückreflektiertem Licht in bifazialen Zellen
- Alterung und Haftung von Oberflächenbeschichtungen werden sorgfältig untersucht und sind mindestens 30 Jahre lang zuverlässig
- Realisierung einer prototypischen BiPV-Anlage zur Demonstration der Machbarkeit der Prototypen, die über das Projektende hinaus in Betrieb sein wird.

Projekttablauf

Der Cover Power zu Grunde gelegte Projekttablauf lässt sich wie im Folgenden für die F&E-Aktivitäten kurz beschreiben:

Die F&E-Aktivitäten beginnen in WP2 und befassen sich hauptsächlich mit den im Projekt anzuwendenden Glasbeschichtungstechnologien. Obwohl es sich bei Cover Power um Technologien handelt, die in Forschungsprojekten entwickelt wurden, sind einige „weiße Flecken“ hinsichtlich ihrer Machbarkeit noch zu klären. Insbesondere werden in WP2 Forschungsarbeiten durchgeführt, die notwendig sind, um die Chancen für eine erfolgreiche Prototypentwicklung im weiteren Verlauf des Projektes zu maximieren. So müssen auf der einen Seite beispielsweise Aspekte der Zuverlässigkeit und Stabilität im Detail untersucht werden, um das Entwicklungsrisiken zu minimieren. Auf der anderen Seite werden Technologien und Prozesse angepasst und optimiert, um die gewünschten optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und reduzierte Blendung) zu gewährleisten.

Der Identifikation der machbarste(n) Beschichtungstechnologie(n), folgen in WP3, unter Berücksichtigung der erhaltenen Ergebnisse aus dem WP2, die Erstellung der genauen Spezifikation der PV-Module sowie die Designentwürfe von Modulprototypen und der Fassadeninstallation. Zusätzlich wird eine Simulation zur Abschätzung des zu erwartenden Ertrags der Testfassade durchgeführt.

Basierend auf den Designspezifikationen der vorherigen Arbeitspakete werden in Arbeitspaket 4 Modulprototypen entwickelt. Insbesondere die in WP2 evaluierten und spezifizierten Glasbeschichtungen werden auf Deckglasplatten im Standardmaßstab hergestellt, indem die in WP3 spezifizierten Designs realisiert werden. Für die Prototyp-Testfassade werden Prototypen hergestellt, die als am besten machbar identifiziert werden. Die Modulprototypen werden im Labor, nach den geforderten Regulatorien unter Standardbedingungen nochmals gründlich in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Stabilität gegenüber Bewitterung getestet.

Die in WP5 zu realisierende Testinstallation der Fassade basiert auf den Entwurfsspezifikationen von WP3 und den in WP4 hergestellten Prototypen. Die Testanlage wird auf einer Gebäudefassade realisiert, in Betrieb genommen, ihre Leistungsdaten in einem Dauertest aufgezeichnet und mit der Vorabberechnung abgeglichen.

Ergebnisse und Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen der bereits vergangenen ersten Hälfte des Projekts kann der eingeschlagene Weg zur Realisierung von innovativen Designmöglichkeiten für farbige BiPV Lösungen als erfolgversprechend bezeichnet werden. Die bisherigen Projekt-Highlights lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zur effektiven Farbgebung für Deckgläser von Photovoltaikmodulen wurden die drei verschiedene Beschichtungsverfahren (Sol-Gel-Prozess, Digitaldruck, Starshine®) Technology (FDT) entwickelt und im Hinblick auf Transparenz und farblisches Erscheinungsbild optimiert. Dabei konnte insbesondere gezeigt werden, dass mit allen drei Beschichtungstechnologien ein deutlicher Farbeindruck bei beschichteten Deckgläsern realisiert wird.
- Die beschichteten Deckgläser wurden auf ihre Haftung und chemische Beständigkeit, sowie in Bewitterungstests und beschleunigter Alterung auf ihre Haltbarkeit getestet. Auch hier zeigen vor allem die mit Digitaldruck und Sol-Gel-Beschichtung versehenen Gläser sehr gute Beständigkeit. Ihre optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion und reduzierte Blendung) betreffend, zeigen diese Technologien, nach den vorgenommenen Optimierungen, ebenso eine ausgezeichnete Anwendbarkeit.
- Erste Testmodule mit beschichteten Frontgläsern für jede der zum Einsatz gebrachten Technologien wurden bereits gefertigt und auf Leistung und Beständigkeit getestet. Sie weisen dabei eine wiederum deutlich reduzierte direkte Reflexion (Blendung) sowie eine ausgezeichnete Beständigkeit auf.



DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Cover Power widmet sich intensiv mit der ästhetischen Verträglichkeit gebäudeintegrierter Photovoltaik, einem der Schlüsselp Parameter für eine weitreichende Akzeptanz der Produkte.
- Spiegelnde Glasoberflächen bewirken bei der Betrachtung sehr oft einen unangenehmen und stark technischen Eindruck in der Betrachtung. Eine Reduktion der auftretenden Blendwirkung führt damit zu einem natürlicheren und angenehmeren Einfügen von Solarmodulen in Gebäudefassaden.
- Die Zusammenarbeit der österreichischen und schweizerischen Partner – sowohl aus Forschung und Entwicklung als auch aus der Industrie – bietet die Möglichkeit der gegenseitigen Bereicherung und erhöht die Entwicklungsgeschwindigkeit von in Europa hergestellten BiPV-Produkten für europäische Märkte und darüber hinaus.



Quellen

- [1] Biermayr, P. et al. *Innovative Energietechnologien in Österreich 2017. Nachhaltig Wirtschaften* (2018).
- [2] Fechner, H., Mayr, C., Rennhofer, M., Schneider, A. & Peharz, G. *Photovoltaik Technologie-Roadmap Teil 2. Nachhaltig Wirtschaften* (2018).
- [3] The European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council; on the indication by labelling and standard product information of the consumption of energy and other resources by energy-related products (recast). *Off. J. Eur. Union* 1–12 (2010). doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- [4] Die Republik Österreich. 72. Bundesgesetz: Energieeffizienzpaket des Bundes; Umsetzung nach RICHTLINIE 2012/27/EU. *Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Teil I*, (2014).
- [5] SOLAR EUROPEAN INDUSTRIAL INITIATIVE. SET-Plan SOLAR EUROPEAN INDUSTRIAL INITIATIVE (SEII) PV IMPLEMENTATION PLAN 2013 – 2015 APPROVED BY THE SEII TEAM. 31 (2013). Available at: https://setis.ec.europa.eu/system/files/Solar_PV_EII_2013-2015_IP.pdf
- [6] Peharz, G. & Ulm, A. Quantifying the influence of colors on the performance of c-Si photovoltaic devices. *Renew. Energy* 129, 299–308 (2018).



Project management: SHOKUFEH ZAMINI
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Outdoor test setup, at AIT, Vienna

FIGURE 1



Bi-Face

High-efficiency bifacial PV Modules and Systems for flat roofs

Introduction/initial situation

Although bifacial cells need some additional manufacturing steps, from an economical point of view the production costs are comparable and the yield increase can be between 5 and 30% yield [1,2]. This depends on the solar cell technology used, the location and system design. Today one of the most effective ways to include PV is the usage of solar panels on manufacturing sites and public buildings, where the generated power is used immediately. In many of these buildings, flat roofs are state of the art. Therefore, the BI-FACE project focused on optimized light weight bifacial PV systems for flat roofs.

The first main challenges at the beginning of the project were optimization of the module itself, e.g. the used components and design rules. Novel materials for i.e. encapsulation and glass/foil had to be evaluated with regards to costs as well as reliability. Furthermore, the manufacturing process was not well analyzed and needed optimization. Besides that, also the characterization of the built modules was still challenging. At that time the characterization of bifacial modules was not well defined, labelling was therefore unprecise and unsatisfactory for customers as well as for manufacturers.

Especially there was a big gap between laboratory and manufacturer characterization and measurements. Parallel to these module aspects the second main

challenge was the optimization of the overall system design, where layout and mounting design of the system had to be optimized for energy performance. Energy performance of a system is critically influenced by structure and albedo of the roof surrounding modules and shape of the modules and should be thus evaluated and optimized to achieve maximum performance. The system design needs to take into account different (ballast) load profiles, due to added wind load, which can influence ground reflection and irradiation. Heavy ballast contradicts the requirements of many flat roofs, as many cannot handle heavy weights. This combined optimization of module, system and construction needed to be combined with the economic needs to have high energy yield at low costs.

Project Objectives

Bi-face project aims at the following objectives:

1. Improving the bifacial system construction to meet demanding flat roof weight requirements
2. Energy yield improvement, while decreasing the ratio between costs and performance
3. Defining standards for characterization
4. Developing appropriate measurement infrastructures
5. Improved installation/application guidelines
6. Quantifying the actual energy yield benefits compared to conventional PV modules under different climate conditions



“Bifacial, ‘double-sided’ solar modules ‘capture’ more sunlight and hence higher energy yields are possible. Bifacial technology reduces costs by producing energy from both sides of a PV-module, at almost equal production costs. The technology is rapidly gaining market share – from almost zero to 10 % in 2018, and ~14 % in 2019, with a rising trend of 30 % in 2024.” PROJEKTLEITERIN SHOKUFEH ZAMINI

Methods of the project

Various methods had to be considered to achieve the beforementioned objectives.

New simulation tools for module and system were developed, along with a high-end simulation tool for bifacial systems on flat roofs with regard to wind load. As measurements at manufacturing site needed to be in accordance to laboratory measurements, a contribution for standardization was created. The optimized lightweight modules were developed to meet reliability, performance and special wind load test requirements. The modules were validated by aging tests according to best practice and standard drafts for bifacial modules. Outdoor systems were placed in different European climate zones to evaluate the system. Both the optimum performance of a bifacial system in different climate zones (subtropical, temperate and temperate maritime) and the optimum for stable construction under different climatic load conditions (wind near the North Sea, snow in the Alps) were modeled, validated and integrated in the final product(s). Finally, a system was placed on a commercial flat roof to assess the system in a relevant operational environment.

The modeling of influential parameters on bifacial modules performance was split into two parts. Initially, the needed objectives and constraints for general design of bifacial modules and for the modeling and

simulation was identified by detailed analysis, based on desk research and experience of the consortium. This covered the definition of the influential parameters of bifacial modules (cell density, partial shadings, reflections, position of junction box and label, construction, back wall/ground distance, back wall/ground color, backside cooling system), as well as the specification of important output parameters. Thereafter the model of influential parameters on bifacial modules performance was developed. This model calculated the reflections, transparency and shading of all PV module components.

Based on the identified influential parameters and models, there was a focus on the optimization of the bifacial module design and possibilities for optimizing yield under economic considerations by SAL and Kioto Photovoltaics. Here a focus was put on geometrical and structural considerations, such as the influence of cell spacing within the module to find the best compromise of module/glass size, cell distance and optimal specific energy yield (optimized illumination of the rear side by reflection). Further general design rules concerning the shadowing effects of the frame or the positioning of the junction box were considered. Also the overall module size and standard glass alternatives were investigated due to possible weight reductions. Another focus was put on finding the optimal encapsulation material. Testing of advantages of EVA



with specific UV cut-off on both module sides as well as a comparison of different encapsulation technologies and processes were conducted. Also, the interdependency of cell and module design was an important point, since cells and modules need to be designed together, with respect to contacting, (half-)cell layout, bypass diode arrangement, etc., to achieve maximum energy yield (evaluation and optimization of cell to modules losses). Finally, economic aspects such as the influence of material variations on costs, e.g. comparison of energy gain according to increased spacing and thereof increased overall module size, was investigated.

The influential parameters on the performance of the bifacial systems were defined and optimized to achieve maximal performance of the bifacial system on flat roofs. The existing and verified model, developed by TNO [2], was modified, such that the module itself but also other parts of the system (like the roof) were considered. The direct and indirect irradiance models were revised to incorporate this more complex structure. Modelling included, ground-reflected irradiance depending on the geometry of the complex structure and considers the self-shading of the system, which affects the homogeneity of the rear illumination. While the effect of snow load can be modeled as a homogeneous deposited weight, added to a roof, the wind load is more dynamic.

A 2D/3D computational fluid dynamics (CFD) model was developed suitable to analyze the wind behavior on the system, which includes strong winds, turbulence and effects from one module to the other. The model is able to perform 3D simulation of buildings with different aspect ratios, at different wind speed, to determine the wind velocity expected at the roof of different buildings. Module design considered optimized components, appropriate characterization techniques, labeling and datasheets. Furthermore, there were also many new possible components in the optimized modules which needed to be tested

and analyzed in terms of reliability and durability. To meet all these challenges the module design was performed in different phases. First the mini-modules with various designs were produced and several statistical analyzations have been conducted using RStudio. Designed modules varied in eight design parameters (cell technology, full- or half-cell, spacing row, spacing column, encapsulation material, front and back side, coating) in order to identify parameters that would further boost performance. The results were considered for the design of standard size modules, which were adjusted for getting the best performance. Furthermore, performance and reliability testing strategies of the new designed bifacial modules were analyzed, regarding the proposed methods in the draft of the standard for performance measurement of bifacial modules.

The defined module design adaptations resulted in an adjustment of the manufacturing procedure, e.g. a variation of the lamination time, temperature settings or the cooling process. Furthermore, also additional changes of the module design, such as the positioning of the junction box, placement and distance of cells, implementation of half cells were considered. Another special focus was put on the lightweight aspect of the modules. Therefore, also thin glasses were evaluated in detail. The aim of this task was to reach a similar cost structure than for standard glass-glass modules with a yield increase.

A study and comparison of two different indoor measurement methods (raised illumination on front side and double-side measurement) was performed. Subsequently, the U/I characteristics on the front and back side under standard test conditions (STC) and the spectral response on the front and back side were performed and evaluated. From these results, the bifaciality coefficients for short-circuit current, open-circuit voltage and maximum power were determined.

The innovative bifacial modules components and manufacturing parameters from the previous tasks were tested regarding their reliability. A special focus was given to the evaluation of the used embedding material, the efficient positioning of the junction box, the used edge sealers and the framing. In this task partial shadings on the front and back side and immunity testing of the new modules to voltage, temperature and humidity (PID-shunting, PID-delamination, damp heat), mechanical load and irradiation light induced were performed.

For comparison reasons AIT took part in an international bifacial Round Robin with 24 institutes worldwide. The results show a good compatibility between the characterization methods among different institutes.

The bifacial systems which are successfully created and tested were placed on four flat roofs (or similar setups) to validate the performance of the system under varying weather conditions and global positioning. Four different climate conditions were represented for the validation. The different locations represent three different climate conditions, representing the climate conditions as can be found throughout Europe. The systems were placed in the Netherlands, (temperate maritime climate, windy conditions), Vienna (Austria, at AIT, temperate Central European climate), Wies, Austria, (temperate Central European climate, not urban conditions) and Nicosia (Cyprus, at the University of Cyprus, subtropical climate). Comparison on performance and construction of the systems provided an overview of the expected output and stability in various weather conditions, such as irradiance, temperature, wind load, snow load and the influence on the bifacial system were evaluated.

To demonstrate the performance of a larger innovative bifacial system on large flat commercial roofs, a system of more than 20 solar panels was placed at Tempres, The Netherlands. Besides the evaluation of the optimized system on performance and construction stability, also the albedo effects of the roof itself can be evaluated as the roof is white. Additionally, placing the larger systems on a commercial flat roof will provide information on the handling and ease of installation of the placement of the system.

Results and outlook

Bifacial modules have a considerable advantage over monofacial modules in a wide variety of different applications, such as, thermal, wind and noise insulation, shading systems, winter gardens, balconies, car ports, greenhouses, etc. where they can use irradiation from both sides and thus yield more energy on the same area and have a higher effective module power compared to monofacial modules.

The main expected results of the project were:

1. New validated simulation tools for bifacial modules and systems, including simulation of the wind load

The project aimed at simulating energy yield for bifacial modules and systems, taking into account the construction needs of systems on flat roofs. The simulation was based on the model of bifacial modules and systems with appropriate characterization, weather conditions and other influential parameters (temperature, shadings, reflections, applications, albedo etc.). The models were validated for outdoor conditions.

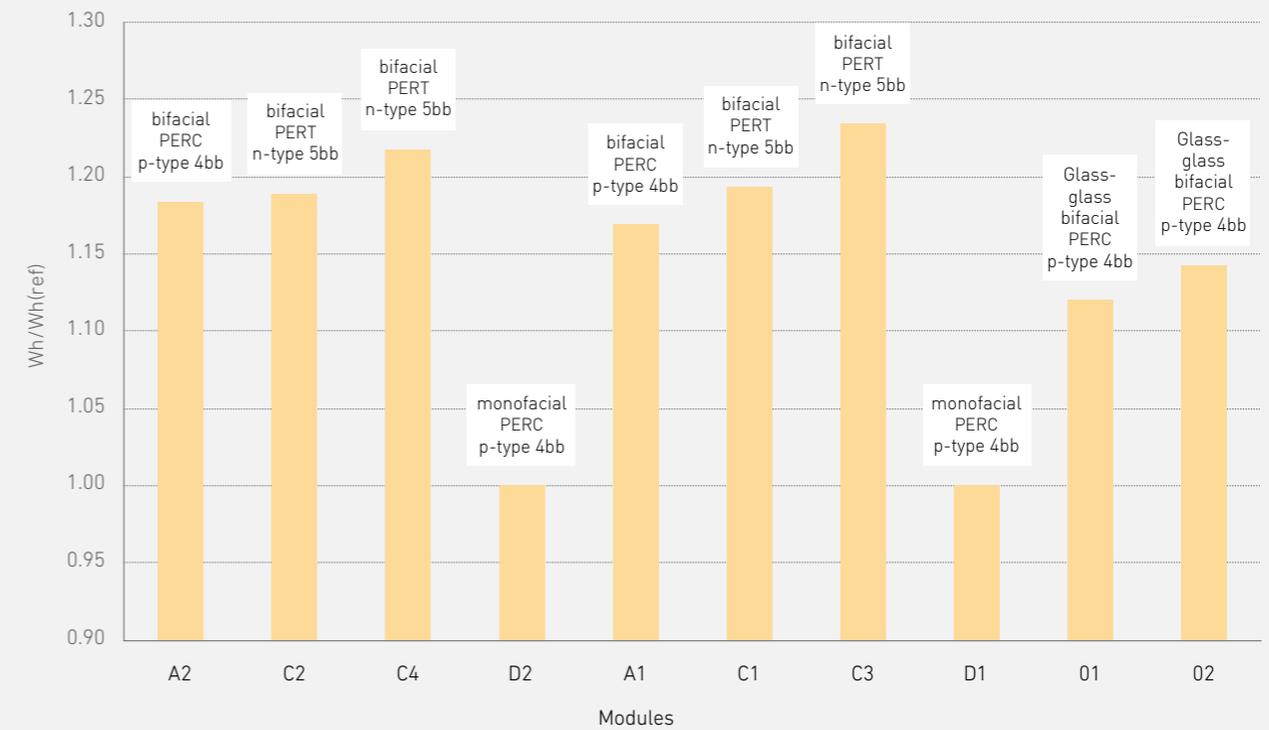
2. Modeled and validated standardization advice for characterization of bifacial modules

Bifacial modules were characterized and described to be able to assess and validate the energy performance of bifacial module in a trustworthy manner.



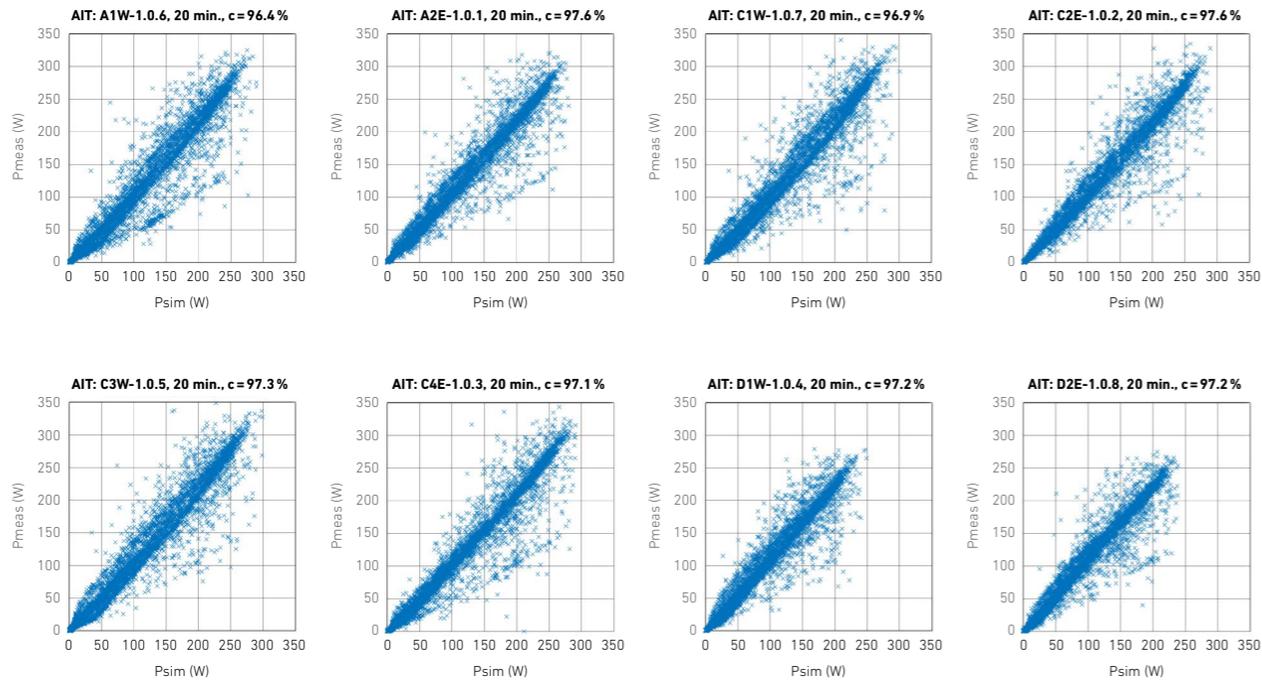
The bifacial gain for two weeks in April in Vienna, shows up to 23 % more energy compared to monofacial modules.

FIGURE 2



Clear correlation of the measurements and the simulation of the power data for Vienna (Simulated by TNO)

FIGURE 3



3. Developing new high efficiency bifacial modules and systems
The main innovation leading to the advancement of the state of the art of bifacial modules was to co-develop and co-optimize new bifacial modules and systems, which will allow an increased efficiency and energy yield, and provide a significant reduction of electricity generation costs.
4. Outdoor performance qualification of the bifacial system in different European climate zones and wind and snow load conditions
The optimized bifacial systems were placed on flat rooftops in the three different European climate zones (subtropical, maritime temperate and temperate) and subjected to significant load conditions, in both wind (near North Sea) and snow (not urban area). This will provide the European community with the needed input to what end-users can expect from bifacial systems.
5. Guidelines for flash tester upgrade at the module manufacturer's site
Another innovation concerns performance evaluation after module manufacturing. During the project, strategies to accurately obtain the module performance with the flash tester, available at the manufacturer's site, were evaluated and integrated into the standardization process, which was in development at the beginning of the project.

The commercial goals of the project were developing new foundations for the involved industrial partners and the possibility to increase their revenue due to optimized components and better characterization methods.

THREE GOOD REASONS FOR THE PROJECT

- Bi-face project analyses optimized conditions for novel lightweight bifacial modules and systems for flat roofs and hence improves manufacturing strategies
- Bi-face project compares energy yield for three different climates: Subtropical (Cyprus) – Temperate (Austria) – Maritime temperate (The Netherlands)
- Bi-face project improves performance measurements



References

- [1] <https://www.solarpowereurope.org/blog-solar-technology-update>, September 17, 2019
- [2] G. Janssen et al., "Outdoor performance of bifacial modules by measurements and modelling", Energy Procedia 77, pp. 364–373, 2015



Acknowledgement

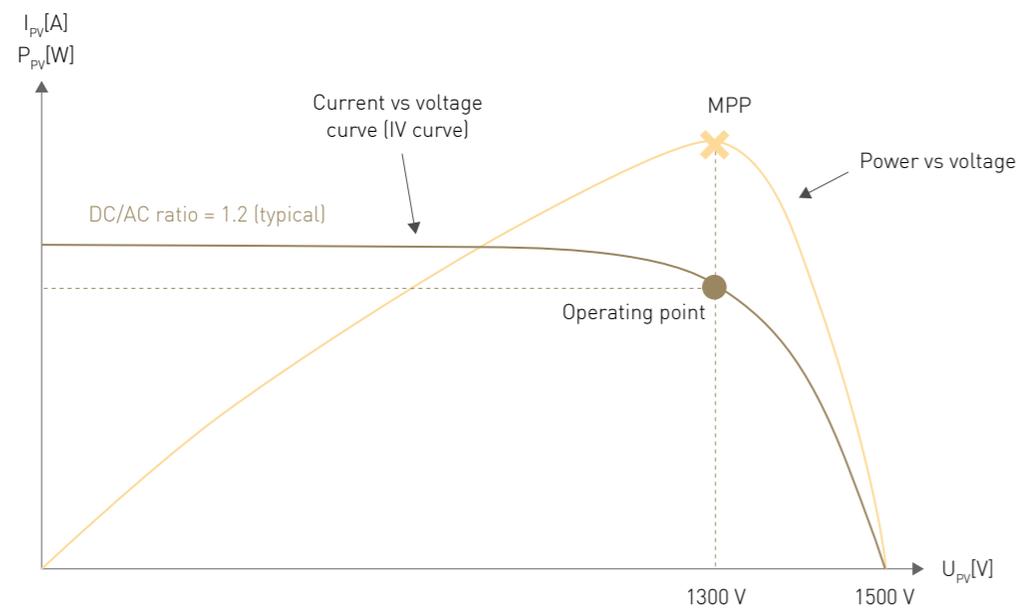
This work is done in the framework of the project "BI-FACE". Project "BI-FACE" is supported under the umbrella of SOLAR-ERA. NET Co-funded by [FFG, and RVO]. SOLAR-ERA.NET is supported by the European Commission within the EU Framework Programme for Research and Innovation HORIZON 2020 (Co-funded ERA-NET Action, N° 28).



Projektleitung:
HERBERT PAIRITSCH
Infineon

IV-Kurve und Leistungskurve einer aktuellen PV-Anlage. Die Spannung beginnt im Leerlauf bei 1500 V und sinkt bei maximaler Leistung auf 1300 V.

ABBILDUNG 1



1500 SiC

Develop a new photovoltaic inverter with SiC for full power operation at 1500 V

Einleitung

Die Solarenergieerzeugung, insbesondere Photovoltaik (PV), hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und erhebliche Kosteneinsparungen erfahren. Ein Grund dafür ist der Anstieg der Vorspannung in PV-Modulen, was sich auf das gesamte Erzeugungssystem auswirkt und zu einer signifikanten Reduktion der Anlagenbilanzkosten geführt hat. Außerdem erhöhen Hersteller, um die gestuften Energiekosten zu verbessern, die installierte Gleichstromleistung von PV-Modulen für eine bestimmte nominale Wechselstromleistung des Wechselrichters (sogenannter Kapazitätsfaktor) auf höhere Werte. Für die daraus resultierende größere Spannung des PV-Moduls sind herkömmliche Leistungselektroniklösungen nicht geeignet und neue Ansätze werden erforderlich. – Hier setzt das Forschungsprojekt „1500-SiC: Develop a new photovoltaic inverter with SiC for full power operation at 1500 V“ an.

Schwerpunkte der Forschungsarbeiten in diesem Projekt sind eine entsprechende Auslegung des Gesamtsystems unter Berücksichtigung neuer Schaltungstopologien, die Entwicklung einer adaptierten Chiptechnologie mit dem Ziel geringstmöglicher Wandlungsverluste sowie eine Adaptierung der Technologie an die Anforderungen im Bereich Höhenstrahlungsresistenz.

Ausgangssituation und aktuelle Trends

Im Bereich der Solarenergieerzeugung spielen die Effizienz und der Kostenfaktor wesentliche Rollen. Die Leerlaufspannung von PV-Paneele steigt von etwa 1000 V auf fast 1500 V, was sich weiter positiv auf die Kosten, speziell auf die Anlagenbilanzkosten, des gesamten Erzeugungssystems auswirkt. Ebenso die Effizienz der Energiewandlung als auch die Ressourceneffizienz (z. B. Kupfer) verbessert sich. Dieser Spannungsanstieg führt in der PV-Industrie zur Notwendigkeit, neue 1500 V Wechselrichter zu entwickeln.

Besonderheit von Photovoltaik-Modulen:

Eine Besonderheit von PV-Modulen besteht darin, dass die Betriebsspannung mit steigender Leistung abnimmt, wie in Abbildung 1 dargestellt. Daher arbeitet das PV-Modul lediglich dann mit hohen Spannungen, wenn ihm nur wenig Strom entzogen wird. Wenn die Leistung zunimmt und die Nennwerte erreicht, sinkt die Spannung typischerweise unter den Schwellenwert von 1300 V. Dieses Verhalten wird von den Herstellern berücksichtigt, um das Wechselrichterdesign zu optimieren, wodurch konventionelle PV-Wechselrichter nicht mit 1500 V Spannung bei voller Leistung arbeiten mussten ... bis jetzt.

Markttrends in Photovoltaik:

Verbesserung der Kosteneffizienz: Die Revolution des PV-Marktes der letzten Jahre war die Überwindung der „Grid-Parity“ (Solaranlagen amortisieren sich auch ohne Förderung der Installation). Das konnte nur durch fortlaufende Innovation und durch stetig wachsendes Marktvolumen erreicht werden. Dadurch haben PV-Module in den letzten Jahren eine enorme Kostenreduktion erfahren (siehe Abbildung 2). Dieser Weg ist auf diverse Faktoren zurückzuführen die auch weiterhin durch Forschung stetig verbessert werden: Umrichter-Konstruktionen mit höheren Spannungen, kostengünstigere Wechselrichter, höherer Modulwirkungsgrad.

Auch die Auslegung des Wechselrichters in Bezug auf die installierte maximale Modulleistung (Englisch: Inverter Load Ratio, ILR) hat einen Einfluss auf die Anlagenkosten. Beim gegenwärtig üblichen Verhältnis von 1,2 wird bei optimaler Modulleistung (maximale Sonneneinstrahlung) die überschüssige Energie nicht genutzt („clipping losses“). Bei steigender Überlastfähigkeit des Inverters kann man bei ökonomisch sinnvoller Kalkulation noch mehr Energie aus einer PV-Anlage gewinnen. Auch ILR-Werte in Richtung 1,5 erscheinen dann noch möglich.

Der Effekt der Erhöhung des ILR ist in Abbildung 3 dargestellt. Bei einer herkömmlichen PV-Anlage mit einem ILR von 1,2 (gelbe Kurve) wird der maximale Leistungspunkt (Maximum Power Point: MPP) typischerweise bei 1300 V oder darunter erreicht. Wenn der ILR auf 1,5 oder mehr ansteigt, wird der MPP bei höheren Spannungen erreicht. In beiden Fällen ist die Leerlaufspannung mit 1500 V gleich und dementsprechend muss der Wechselrichter mit zunehmendem ILR in der Lage sein, bei höheren Spannungen mit voller Leistung zu arbeiten. Wechselrichterhersteller benötigen Lösungen mit voller Leistung bei 1500 V, um diesem Markttrend folgen zu können.

Die hochmoderne Leistungselektroniklösung zum Erreichen solcher Gleichspannungen mit Standard-Niederspannungs-Siliziumhalbleitern ist eine dreistufige Topologie, die als „Neutral Point Clamped“ (NPC) bezeichnet wird. Dies ist eine etablierte Lösung, die 1500 V erreichen kann. Dreistufige Topologien bieten einige technische Vorteile wie eine höhere Effizienz und eine erhöhte Robustheit gegenüber kosmischen Strahlen auf Kosten einer höheren Komplexität und Ausfallsrate.

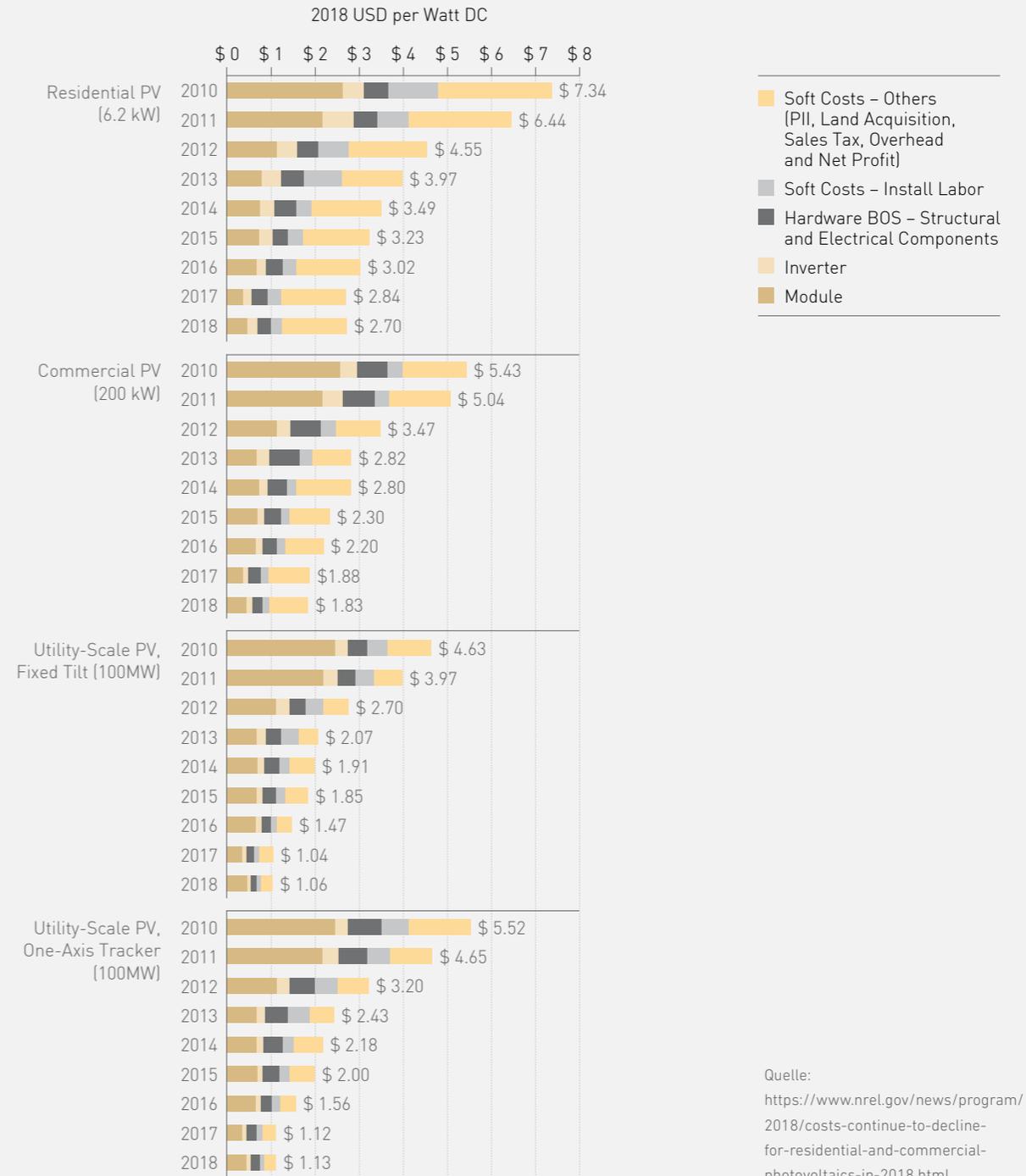
Verbesserung der Netzunterstützungskapazitäten:

Ein weiterer starker Trend in der PV-Branche ist die Verbesserung der Netzunterstützungskapazitäten. PV-Wechselrichter müssen anspruchsvollere Anforderungen erfüllen, um einen höheren Anteil von PV-Energie im elektrischen System zu ermöglichen. Mit zunehmender Reife der Technologie können PV-Anlagen wie herkömmliche Kraftwerke bestimmte Netzereignisse unterstützen. Für den Wechselrichterhersteller bedeutet dies, dass jeder neuen Generation von PV-Wechselrichtern erweiterte Funktionen und Fähigkeiten hinzugefügt werden müssen, zum Beispiel der Austausch von Blindleistung mit dem Netz. Traditionell sollte ein PV-Wechselrichter rein aktiven Strom in das Netz einspeisen. Heutzutage wird die Möglichkeit eine bestimmte Menge an Blindleistung zu absorbieren oder zu injizieren Realität.

Damit diese Funktionalität möglich ist, müssen bestimmte Leistungskomponenten so ausgelegt sein, dass sie in diesen neuen Betriebspunkten sicher funktionieren. Blindleistung bedeutet eine höhere Belastung der Freilaufdioden der Leistungsmodule. Diese Dioden begrenzen die Blindleistungsfähigkeit des Wechselrichters und sind teilweise für den Wirkungsgradabfall beim Arbeiten mit einem Leistungsfaktor ungleich eins verantwortlich.

NREL-Kostenbenchmarks für 2018 für installierte PV-Systeme

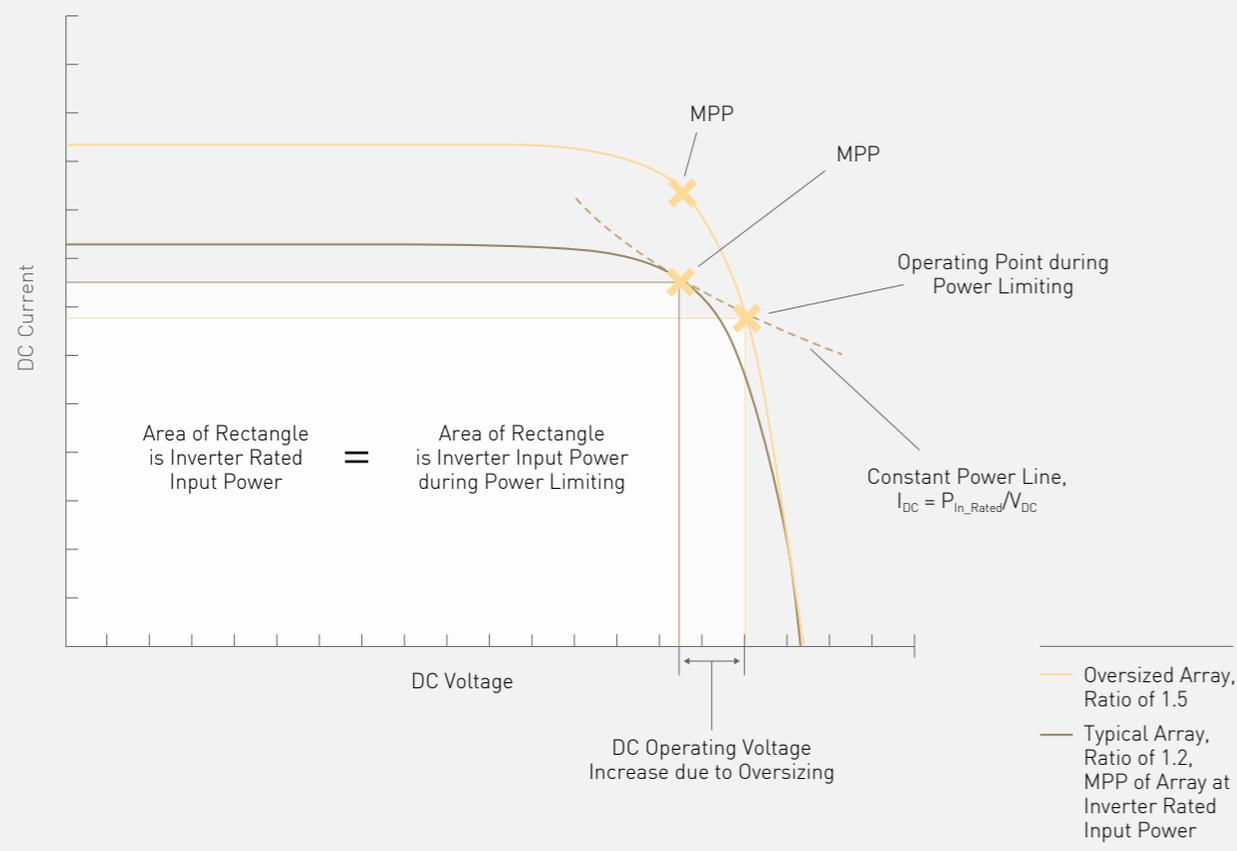
ABBILDUNG 2



Quelle: <https://www.nrel.gov/news/program/2018/costs-continue-to-decline-for-residential-and-commercial-photovoltaics-in-2018.html>

IV-Kurven von zwei PV-Anlagen: eine mit einem ILR von 1,2 und eine mit einem ILR von 1,5, Solectria

ABBILDUNG 3



Quelle: <https://www.civicsolar.com/article/solectria-array-oversizing>

Um die Blindleistungsfähigkeit eines bestimmten Wechselrichters zu verbessern, sind Hybridleistungsmodulare eine geeignete und unkomplizierte Lösung. Diese Module haben die gleichen Gehäuse und IGBT-Chips wie die Standardversionen, aber die herkömmlichen Dioden auf Siliziumbasis werden durch Schottky-Dioden aus Siliziumkarbid (SiC) ersetzt. SiC-Dioden bieten geringere Leistungsverluste als herkömmliche Siliziumdioden und ermöglichen so eine höhere Leistung bei gleicher Chipfläche.

Energieeffizienz: Schließlich wird Energieeffizienz auch für PV-Wechselrichter zu einer wichtigen Anforderung. Dies ist wiederum auf einen hart umkämpften Markt zurückzuführen. In diesem Sinne sollten sich die beiden genannten Verbesserungen (Migration von einer herkömmlichen Topologie mit zwei Ebenen zu einer NPC-Topologie mit drei Ebenen und Ersetzen herkömmlicher Dioden auf Si-Basis durch SiC-Dioden) als sehr hilfreich erweisen, um die Energieeffizienz zu verbessern.

Um in einem stark umkämpften Markt weiterhin erfolgreich zu sein, müssen PV-Modulhersteller den aktuellen Trends folgen und bei zukünftigen Produkten auf Kostenreduktion, Netzunterstützungskapazitäten und Energieeffizienz achten.

Projekthalt und Forschungspartner

Das Projekt 1500-SiC mit dem Langtitel „Develop a new photovoltaic inverter with SiC for full power operation at 1500 V“ bezieht sich auf die aktuellen Markttrends sowie die daraus resultierenden ehrgeizigen Anforderungen. Die Forschungsaktivitäten zielen darauf ab, alle erforderlichen Technologien und Komponenten für den Bau eines neuen PV-Wechselrichters zu entwickeln und zu testen:

- Volle Leistung bis 1500 V
- Blindleistungsfähigkeit
- Maximale Energieeffizienz über 98,8%

Außerdem wird der neue PV-Wechselrichter eine bessere Leistungsdichte haben, was die Erreichung der oben genannten Ziele mit sich bringt.

Zum Konsortium gehören Gamesa Electric aus Spanien, weltweiter Anbieter von PV-Wechselrichtern; Infineon Technologies Austria, weltweiter Anbieter von Halbleitern für die Leistungselektronik; und das Advanced Power Semiconductor Laboratory der ETH Zürich aus der Schweiz, ein erstklassiges Forschungszentrum für Halbleiterbauelemente und Leistungsmodulare. Insbesondere werden die Projektpartner zusammenarbeiten, um eine neuartige Siliziumkarbid-Diode und einen Wechselrichter der MW-Klasse zu entwickeln, die für die Nennleistung bei Spannungsebenen bis zu 1500 V optimiert sind. Die notwendigen Technologien werden im Rahmen einer umfassenden Testkampagne in vollem Umfang entwickelt und getestet.

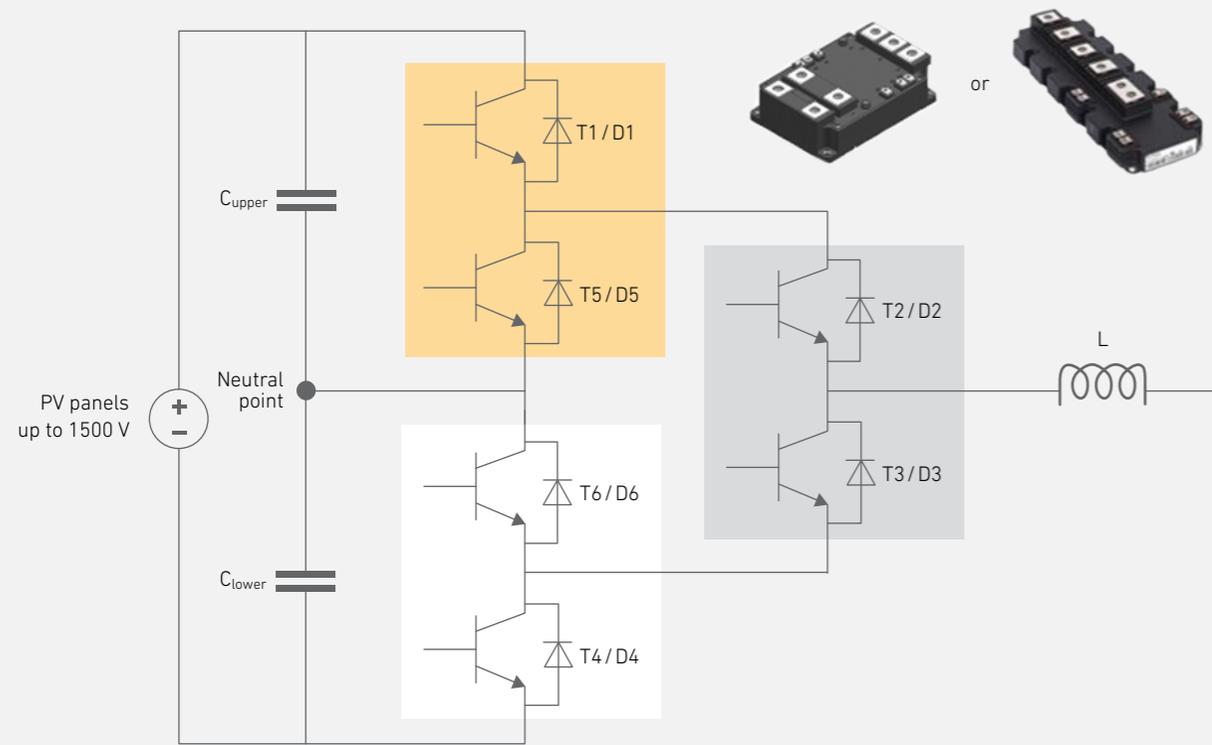
Projektsetup und -verlauf

Um die Anforderungen zu erfüllen, wurden während des Projekts einige Verbesserungen erreicht:

- Aktive NPC-Topologie auf drei Ebenen. Active NPC ist eine NPC-Variante, die 6 Schalter pro Phase anstelle von 4 verwendet (siehe Abbildung 4). Dies ermöglicht eine höhere Leistung, da die neuen Schalter verwendet werden können, um den Rest der Halbleiter zu entlasten.
- Hybridleistungsmodulare (Si-basierte IGBTs + SiC-Dioden) zur Ermöglichung der Blindleistungsfähigkeit und zur Verbesserung der Energieeffizienz.
- Weltweit erste Realisierung von SiC-Dioden für den 1500 V Dauerbetrieb nach dem „Merged Pin Schottky“ (MPS) Prinzip. Im Vergleich zu den üblichen Standard-SiC-Dioden in dieser Spannungs-kategorie zeichnen sich die MPS-Dioden durch überragendes Überlastverhalten aus (siehe Abbildung 5).

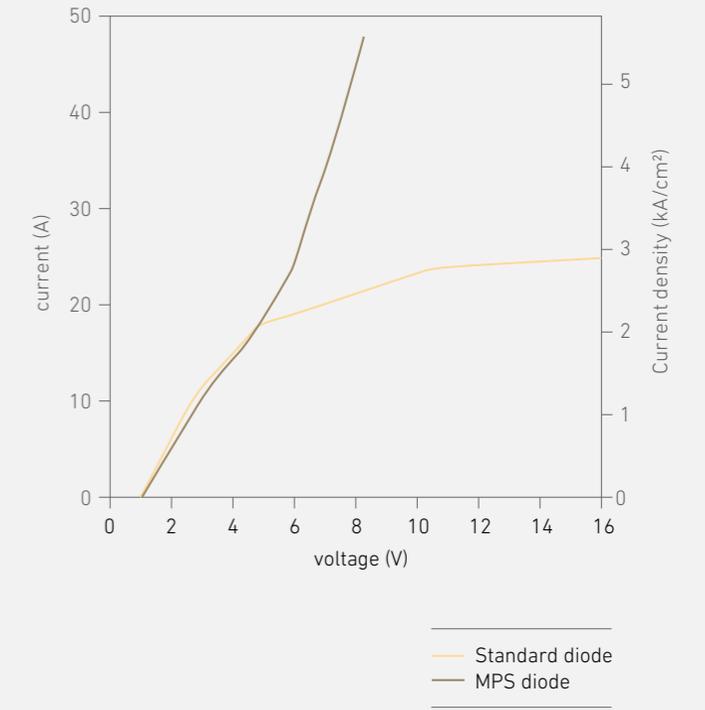
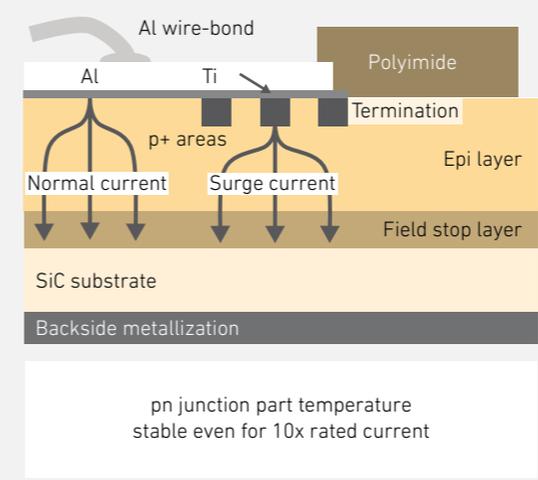
Aktive NPC-Topologie, die mithilfe von Dual-Power-Modulen erstellt wurde.
Im Schema ist nur eine Phase dargestellt.

ABBILDUNG 4



Prinzip und Kennlinie der neuartigen MPS SiC 1500 Diode

ABBILDUNG 5



- Neuer Netzfilter. Die Induktivität des Netzfilters ist eine der sperrigsten, schwersten und teuersten Komponenten im gesamten Wechselrichter. Durch die Optimierung dieses Filters können die Projektziele in Bezug auf Kosten, Energieeffizienz und Leistungsdichte erreicht werden.
- Neues Steuergerät mit höherer Rechenleistung und verbessertem Kühlsystem.
- Umfangreiche Testaufbauten zur Charakterisierung der Robustheit der Halbleiterkomponenten inklusive der kritischen Höhenstrahlungsfestigkeit. Die untersuchten Eigenschaften erfüllen die Erwartungen (siehe Abbildung 6)

Um diese Ziele zu erreichen arbeiteten die Kooperationspartnerpartner in 4 technischen Arbeitspaketen miteinander (siehe Abbildung 7), welche zugleich die langfristig verwertbaren Ziele der einzelnen Projektpartner darstellen:

GAMESA arbeitet an der Markteinführung eines PV-Wechselrichters, der bei voller Leistung mit 1500 V betrieben werden kann.

INFINEON plant die Markteinführung der neuartigen SiC Diode, welche die speziellen Anforderungen von Solaranwendungen mit 1500 V Paneelen erfüllen kann.

ETH Zürich baut Testkapazitäten für Komponenten von energieeffizienten leistungselektronischen Anwendungen wie PV-Großanlagen und Traktionswechselrichtern auf und erweitert das Know-how für fortschrittliches Prototyping von Leistungsmodulen sowie von Testprotokollen für die Prüfung von Leistungsmodulen.

Ergebnisse

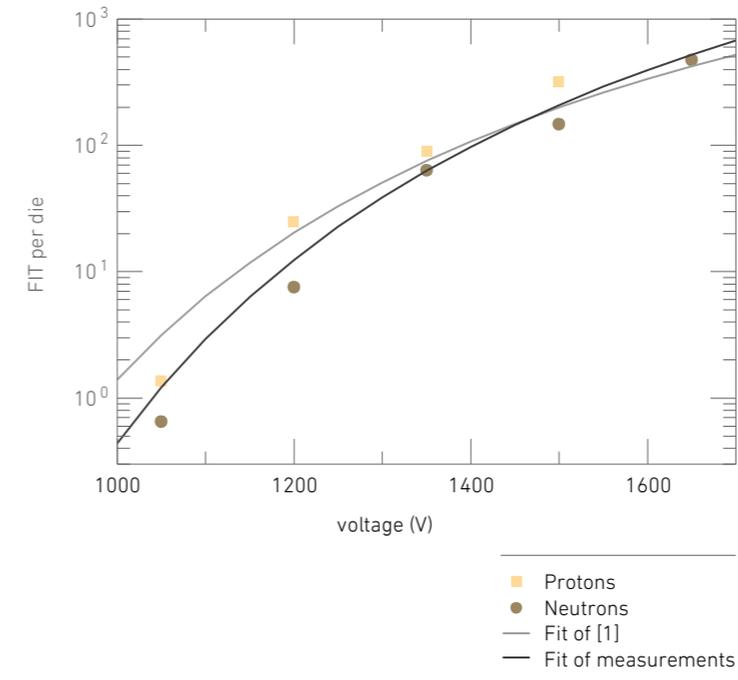
Das Forschungsprojekt befindet sich derzeit in der Endphase. Einige Prototypen des neuen PV-Wechselrichters wurden bereits bei voller Leistung hergestellt und getestet. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen das Ergebnis dieses neuen von den Projektpartnern gemeinsam entwickelten Inverters. In Bezug auf den dreistufigen aktiven NPC-Leistungsblock wurden umfangreiche Tests durchgeführt, um seine Leistung und Robustheit zu bewerten. Es wurden Schlussfolgerungen zu den Vor- und Nachteilen dieses Leistungsblocks gezogen und einige Ideen vorgeschlagen, um dieses Konzept weiter zu optimieren.

Der neue PV-Wechselrichter von Gamesa wird in eine neue PV-Station integriert und bietet so eine komplette Plug & Play-Lösung mit höchster Zuverlässigkeit und maximaler Leistung, um die bestmöglichen „Levelized Cost of Energy“ (LCoE) zu erzielen.



„Failures In Time“ (FIT) Werte bei Protonen und Neutronenbeschuss in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

ABBILDUNG 6



- Fit using the established equation
- $FIT/cm^2 = C_3 \cdot \exp\left(\frac{C_2}{C_1 - V_{DS}/V_{DS,br}}\right)$
- $C_1 = 0.2, C_2 = 5, C_3 = 4 \cdot 10^6$
- $V_{DS,br} = 1800 \text{ V}, A_{active} = 14 \text{ mm}^2$

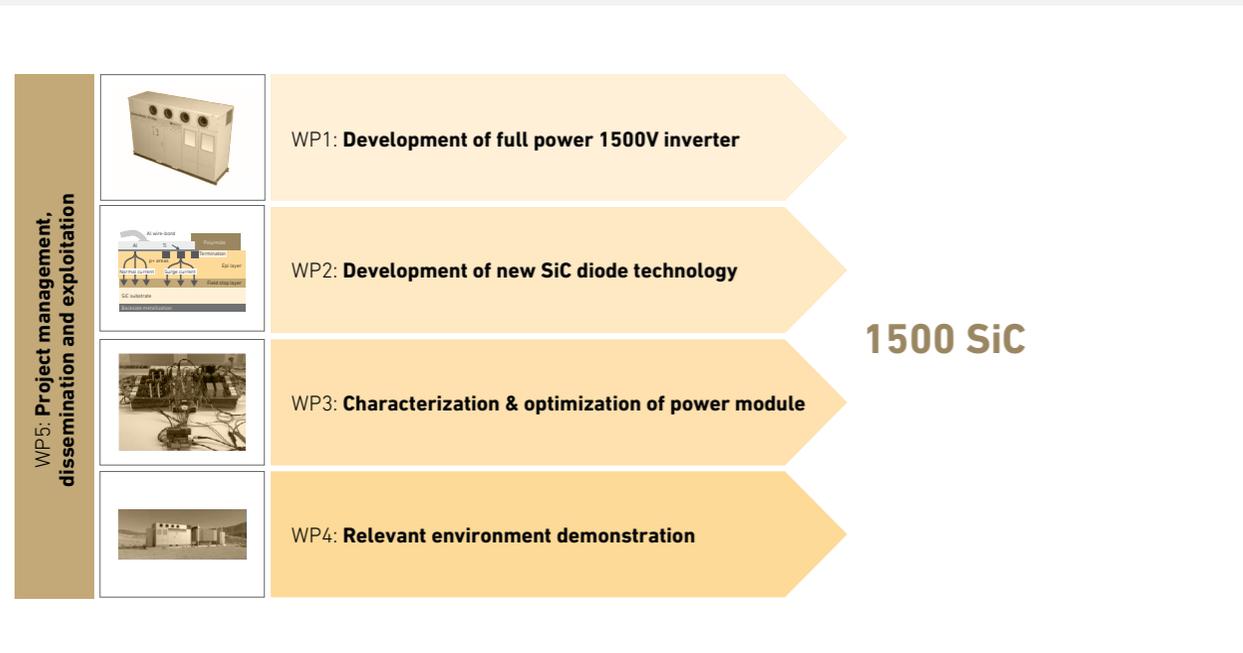


„Der CO₂-Fußabdruck des menschlichen Energieverbrauchs ist noch immer viel zu hoch. Weiteres Wachstum und weiterer Fortschritt in der Photovoltaik (PV) ist ein großer Hebel zur CO₂-Einsparung. Ziel dieses Projekt war daher die bereits guten Effizienzwerte der PV noch einmal zu verbessern. Dazu soll ein neuer hocheffizienter PV-Inverter mit innovativer Chiptechnologie für Betriebsspannungen von 1500 V entwickelt werden.“

PROJEKTLEITER HERBERT PAIRITSCH

1500 SiC Projektstruktur

ABBILDUNG 7



Der neue PV-Wechselrichter PV 3750 von Gamesa erreicht bis zu 1500 VDC und bis zu 3,75 MW.

ABBILDUNG 8



Die neue PV-Station von Gamesa (bis zu 7,5 MW) mit MV-Transformator und Schaltanlage

ABBILDUNG 9



Diese PV-Station besteht aus zwei PV-Wechselrichtern (mit einer maximalen Leistung von 7,5 MW), einem Mittelspannungstransformator sowie dem gesamten erforderlichen Schalt- und Kommunikationszubehör.

Ausblick

Das Ziel von 1500-SiC war die Entwicklung von Leistungselektroniklösungen, die Nennleistung bei 1500 V mit sehr hohem Wirkungsgrad und hoher volumetrischer Leistungsdichte zu wettbewerbsfähigen Kosten liefern können. Das Konsortium umfasst wichtige industrielle Akteure in der Lieferkette der Leistungselektronik für PV-Lösungen und ein etabliertes Forschungszentrum, was die Auswirkung der F&E-Ergebnisse dieses Programms

auf die europäische Industrie für erneuerbare Energien maximiert. Das Team hat 30 Monate gemeinsam an der Entwicklung der neuen PV-Lösung gearbeitet. Die PV-Station von Gamesa Electric wird dank ihrer zahlreichen Verbesserungen gegenüber der vorherigen Generation dazu beitragen, die PV-Energie weltweit weiter auszubauen und PV-Energie sicherer und erschwinglicher zu machen, und somit den menschlichen CO₂-Fußabdruck zu verkleinern.

Acknowledgement:

Das Projekt „1500-SiC“ wurde unter dem Dach von SOLAR-ERA.NET von Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial CDTI, Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG und Bundesamt für Energie BFE gefördert.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Die Erhöhung des Wirkungsgrades um 1 % in der PV Energiewandlungskette entspricht ca. einer Einsparung von 2,5 Megatonnen CO₂ (bei ca. 500 GW_{peak} weltweit installierter PV-Leistung 2018).
- Betriebsspannungen von 1500 V für größere Anlagen reduzieren die Systemkosten und sparen wertvolle Ressourcen (z. B. Kupfer).
- Höhere Robustheit des Gesamtsystems steigert die Zuverlässigkeit und reduziert den Wartungsaufwand.





Projektleitung:
ANDREAS ZIMMERMANN
Sunplugged

Duracis

Advanced global encapsulation solutions for long term stability in industrial flexible CI(G)S photovoltaic technology

Einleitung

Flexible Photovoltaikmodule eignen sich aufgrund ihres geringen Gewichts, des geringen Energieeinsatzes für die Herstellung und der einfachen Integration in andere Bauelemente für die Installation in Gebäuden, für energieautarke Geräte sowie für Transport- und tragbare Photovoltaikanwendungen.

Während die bisherigen Generationen von flexiblen Dünnschichtmodulen hauptsächlich aufgrund ihrer geringen Wirkungsgrade keinen großen Markterfolg erzielen konnten, haben die flexiblen Photovoltaikmodule auf der Basis von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) Absorbern ein großes Marktpotential, da mit diesen Halbleitermaterial hohe Energieerträge erzielt werden können.

Für die Wettbewerbsfähigkeit von flexiblen, CIGS-PV-Technologien ist die Verfügbarkeit von Verkapselungsmaterialien notwendig, welche sowohl niedrige Kosten als auch ausgezeichnete Barriereigenschaften gegenüber Feuchtigkeit aufweisen.

Etwa ein Drittel der Materialkosten von flexiblen CIGS-Modulen entfallen auf transparente Frontfolien, die als Barriere gegen Feuchtigkeitseintritt wirken.

Im DURACIS-Projekt wurden neue Verpackungskonzepte und Materialien entwickelt, die kompatibel mit industriellen CIGS Pilotproduktionslinien sind und eine signifikante Verlängerung der Lebensdauer bei deutlich reduzierten Kosten ermöglichen.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden Technologien und Materialien, die ursprünglich für organische, halbleitende Materialien (Organische LED's, Organische Solarzellen) entwickelt wurden, für die speziellen Anforderungen der CIGS-basierten Photovoltaik weiterentwickelt.

Als Zielwerte sind Kosten von unter 15 €/m² für die gesamte Verkapselung und eine Haltbarkeit von mehr als 25 Jahre für flexible CIGS-Solarmodule angestrebt.

Projektverlauf

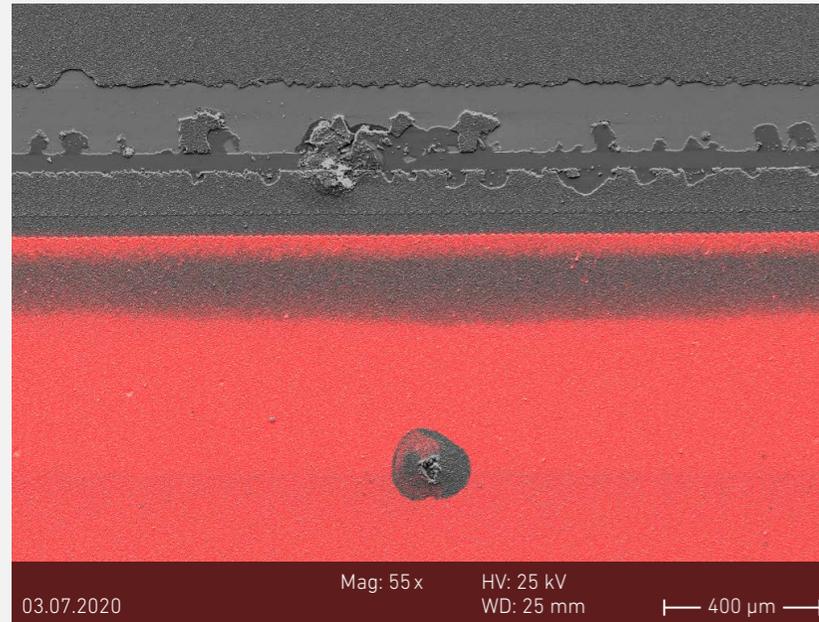
Um diese Ziele zu erreichen, wurden im Projekt drei Entwicklungsrouten verfolgt:

Erstens die Deposition von sehr dünnen und dichten Barrierschichten direkt auf die Solarzellenoberfläche mittels Atomic Layer Deposition (ALD), zweitens das Aufbringen von wasserabweisenden Polymeren und drittens die verbesserte Einbettung der sensitiven CIGS-Solarzellen mittels Thermoplasten, welche sich durch hohe Witterungsbeständigkeit und Transparenz auszeichnen.

Die Entwicklung der ALD Beschichtung wurde vom französischen Subprojekt voran angetrieben und die Entwicklung der wasserabweisenden Polymeren war Schwerpunkt des spanischen Subprojekts.

Electron Beam Induced Current (EBIC) Messung

ABBILDUNG 1

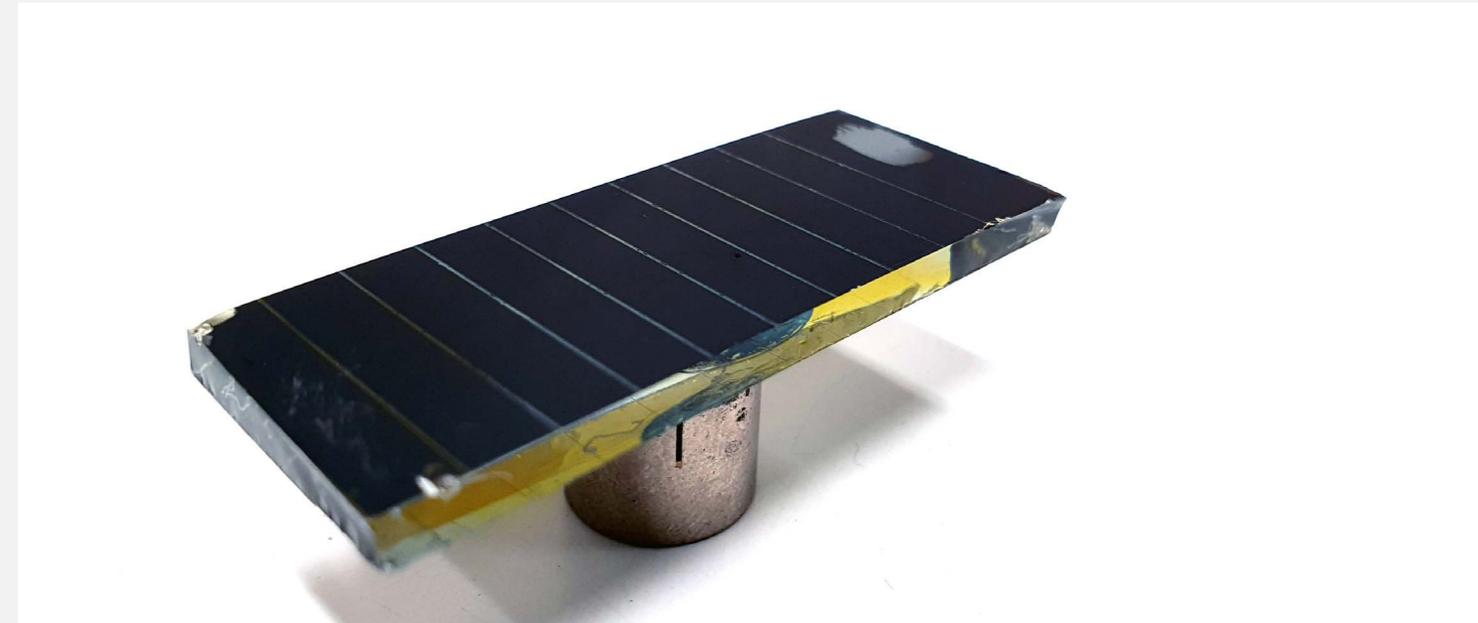


Electron Beam Induced Current (EBIC) Messungen ermöglichen Inhomogenitäten der Stromsammmlung in einem Elektronenmikroskop mit einer Auflösung von 10 nm zu analysieren. Die Abbildung zeigt einen Teilbereich eines CIGS Modules mit ALD-Layer, dass 1000 Stunden in einer Klimakammer behandelt wurde.

„Hohe Langlebigkeit und gute Witterungsbeständigkeit sind ein Muss für Photovoltaikmodule. Flexible Photovoltaikmodule werden mit flexiblen Materialien eingepackt, damit Produkteigenschaften, wie geringes Gewicht, Biegsamkeit und Integrierbarkeit erhalten bleiben. Transparente flexible Verpackungsmaterialien mit guter Feuchtigkeitsbarriere sind sehr teuer und kosten mehr als 40 Euro pro Quadratmeter. Kostengünstige, transparente Feuchtigkeits- und Sauerstoffbarrieren sind eine Voraussetzung für den Durchbruch flexibler Photovoltaik. Kosten von unter 15 €/m² für die gesamte Verkapselung und eine Haltbarkeit von mehr als 25 Jahre werden für flexible CIGS-Solarmodule angestrebt.“ PROJEKTLEITER ANDREAS ZIMMERMANN

Probenpräparation eines CIGS-Moduls zur Analyse mittels EBIC

ABBILDUNG 2



Innerhalb des österreichischen Teilprojekts konzentrierte sich der Projektpartner Lenzing Plastics um die Entwicklung günstiger Folien auf Ionomerbasis, welche die notwendigen optischen und chemischen Eigenschaften für die Verkapselung von flexiblen CIGS Solarzellen aufweist.

Sunplugged testete alle im Projekt entwickelten Verkapselungsansätze mit flexiblen CIGS-Solarzellen aus der eigenen Pilotproduktion und optimierte die Grenzflächen der Solarzellen entsprechend den Eigenschaften der jeweiligen Einbettungsmaterialien.

Weiters wurden flexible CIGS-Solarzellen von Sunplugged mit den ALD Schichten und den wasserabweisenden Polymeren der internationalen Partner versehen und mit den Folien von Lenzing zu fertigen Photovoltaikmodulen komplettiert.

Die Universität Innsbruck begleitete die Entwicklungen mit Ihrem Know-how im Bereich der Charakterisierung von dünnen Schichten und Materialien.

Um ein Basiskonzept zu etablieren, wurden von Sunplugged gemeinsam mit den internationalen Projektpartnern insgesamt mehr als zehn Produktionsreihen von funktionierenden flexiblen Dünnschichtmodulen für Charakterisierung und Tests hergestellt.

Basierend auf den Ergebnissen wurde ein industriell einsetzbares Konzept für die Verkapselung von Ionomer-basierten Einbettungsfolien mit transparenten Frontfolien und kompatiblen rückseitigen Folien von Sunplugged und Lenzing gemeinsam erarbeitet und getestet. Ein Versuchsaufbau zur Tauchbeschichtung von flexiblen CIGS-Solarzellen mit selbstschichtenden Barrierschichten des spanischen Partners Ecolpoltech

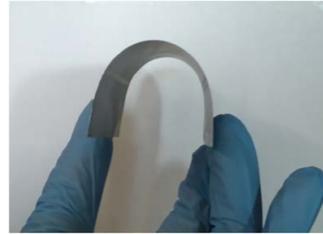
Flexibilität der selbstschichtenden Polymerbarrieren

ABBILDUNG 3

Without coating



LB-37 15%



LB-37 60%



Enough flexible.
Not brittle. Hard
but not brittle due
to polyurethane
elasticity.

Zwei CIGS Module (Teilstücke) mit unterschiedlicher Dicke (25 nm und 80nm) des Al₂O₃ Verkapselungsschicht

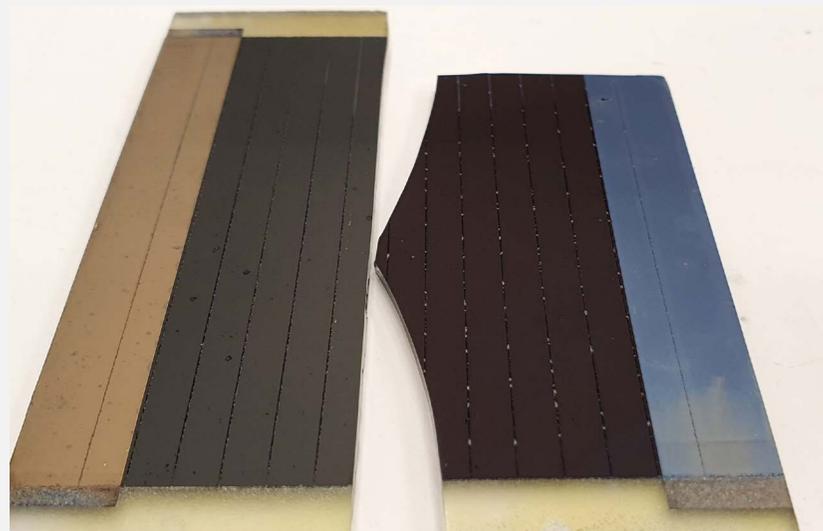


ABBILDUNG 4

Messaufbau für EBIC. Zur detaillierten Untersuchung von Defektstellen nach 1000 h Klimatestkammer

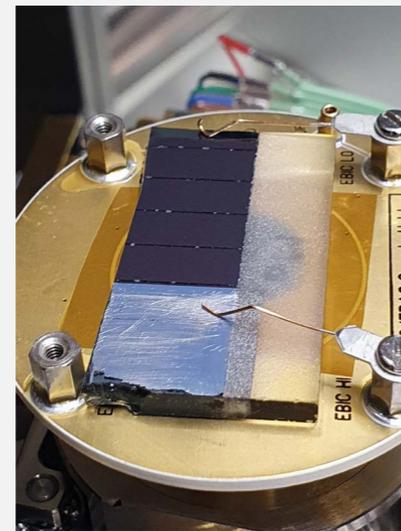


ABBILDUNG 5



wurde bei Sunplugged konstruiert und entwickelt, um die industrielle Übertragbarkeit zu prüfen. Raman-Spektroskopie Mappings von CIGS-Solarzellen und verschalteten Modulen wurden erstellt und die Ursachen für die signifikant unterschiedlichen Ergebnisse von verschalteten und unverschalteten CIGS-Material untersucht.

Ein Konzept für die Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit von CIGS-Solarzellen durch Mehrfach-Frontkontakte wurde erarbeitet und die für die industrielle Umsetzung notwendigen Materialien ausgesucht.

In der zweiten Projekthälfte wurden in mehreren Laminations-Workshops unterschiedliche Einbettungsmaterialien (Lenzing (Ionomer), DNP (Polyolefin)) in Kombination mit günstigen Frontsheets mit geringer Barrierefunktion (Feron, Gredmann, DNP) zur Verkapselung von flexiblen CIGS Dünnschichtmodulen durchgeführt.

Für die transparente Schutzschicht konzentrierten sich Lenzing Plastics und Sunplugged auf die Laminierung verschiedener Kombinationen transparenter Dünnschichtmaterialien und die Kombination mit den selbst ausrichtenden Barrierschichten des spanischen Partners Ecoltech bzw. mit ALD

beschichteten CIGS Modulen. Die verkapselten Dünnschichtsolarmodule wurden an die internationalen Partner (ZSW, Eliosys) zur Prüfung und Charakterisierung weitergegeben.

Ergebnisse und Ausblick

Die Firma Sunplugged GmbH entwickelt ein flexibles Photovoltaikmaterial, welches sich in Bezug auf Größe, Form und elektrischen Eigenschaften kundenspezifisch herstellen lässt.

Das Unternehmen plant eine Produktion für diese neue Technologie in Tirol und beabsichtigt den Vollbetrieb (5 MW_{peak} das entspricht etwa 40.000 qm Photovoltaikfolie) bis Ende 2022 zu erreichen.

Das Unternehmen verfolgt ein Business2Business-Geschäftsmodell, daher die Photovoltaikfolie wird an Unternehmen geliefert, welche die stromerzeugende Folie in Produkte integrieren. Dabei wird die Photovoltaikfolie kostengünstig mit Rolle-zu-Rolle-Verfahren produziert und mit einem digital steuerbaren Laser/Druckprozess wird die stromerzeugende Folie entsprechend den Kundenanforderungen am Ende der Produktion individualisiert. Sunplugged wird die von der Lenzing Plastics Halbezeuge für die Verkapselung der marktreifen Produkte verwenden.

DREI GUTE GRÜNDE FÜR DAS PROJEKT

- Flexible Photovoltaikmodule stellen neue Produktfunktionen bereit und können mit Rolle-zu-Rolle-Verfahren kostengünstig produziert werden.
- Das Projekt führt zu einer Reduktion der Herstellkosten von flexiblen Photovoltaik-Dünnschichtmodulen von mehr als 20 %.
- Das Projekt führt zu einem erheblichen Wissensaustausch zwischen europäischen Akteuren im Bereich von CIGS-Dünnschichtsolarmodulen.





IPERMON: Innovative Performance Monitoring System for Improved Reliability and Optimized Levelized Cost of Electricity

Projektnummer	853373
Koordinator	Gantner Instruments GmbH
Projektleitung	Jürgen Sutterlüti: j.sutterlueti@gantner-instruments.com
Partner	University of Cyprus, FOSS Research Centre for Sustainable Energy
Förderprogramm	SOLAR-ERA.NET 3. Ausschreibung 2014
Dauer	01.04.2016 – 30.09.2019
Budget	300.000 €



LiquidSi 2.0: Liquid phase deposition of Functional Silicon Layers for Cost-Effective High Efficiency Solar Cells

Projektnummer	858491
Koordinator	Technische Universität Graz, Institut für Anorganische Chemie
Projektleitung	Harald Stüger: harald.stueger@tugraz.at
Partner	Evonik Creavis AG
Förderprogramm	SOLAR-ERA.NET 4. Ausschreibung 2016
Dauer	01.04.2017 – 30.09.2020
Budget	373.633 €



Cover Power: Smart Glass Coatings for Innovative BiPV Solutions

Projektnummer	863509
Koordinator	Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
Projektleitung	Roman Trattnig: roman.trattnig@joanneum.at
Partner	FDT GmbH, ehoch2 energy engineering e.U., OFI Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Ertex Solartechnik GmbH, CSEM SA Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique
Förderprogramm	Solar ERA.NET CoFund 1. Ausschreibung 2016
Dauer	01.10.2018 – 30.09.2021
Budget	363.037 €



Bi-Face: High-efficiency bifacial PV Modules and Systems for flat roofs

Projektnummer	863515
Koordinator	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Projektleitung	Shokufeh Zamini: shokufeh.zamini@ait.ac.at
Partner	Silicon Austria Labs (SAL) (A), KIOTO Photovoltaics GmbH (A), TNO (NL), Solar Electricity Development B. V. (NL), Tempres Systems B.V. (NL)
Förderprogramm	Solar ERA.NET CoFund 1. Ausschreibung 2016
Dauer	01.03.2018 – 30.09.2020
Budget	580.905 €



1500 SiC: Develop a new photovoltaic inverter with SiC for full power operation at 1500V

Projektnummer	863519
Koordinator	Infineon
Projektleitung	Herbert Pairitsch: herbert.pairitsch@infineon.com
Partner	GAMESA ELECTRIC S.A., INFINEON Technologies Austria AG, ETH Zurich
Förderprogramm	Solar ERA.NET CoFund 1. Ausschreibung 2016
Dauer	01.03.2018 – 30.06.2020
Budget	501.946 €



Duracis: Advanced global encapsulation solutions for long term stability in industrial flexible CI(G)S photovoltaic technology

Projektnummer	858494
Koordinator	Sunplugged
Projektleitung	Andreas Zimmermann: andreas.zimmermann@sunplugged.at
Partner	Universität Innsbruck, Lenzing Plastics GmbH
Förderprogramm	SOLAR-ERA.NET 4. Ausschreibung 2016
Dauer	01.06.2017 – 31.05.2020
Budget	286.767 €

Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22, 1060 Wien

Tel: (+43 1) 585 03 90, Fax: (+43 1) 585 03 90-11

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Für den Inhalt verantwortlich

Die AutorInnen tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Broschüre. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider. Weder der Klima- und Energiefonds noch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) oder die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung

www.angineering.net

Verlags- und Herstellungsort: Wien

Wir haben diese Broschüre mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt und die Daten überprüft. Rundungs-, Satz- oder Druckfehler können wir dennoch nicht ausschließen.

www.klimafonds.gv.at

In Kooperation mit:



 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

