

Solarstrom
Tandem-Solarzelle im Labormaßstab

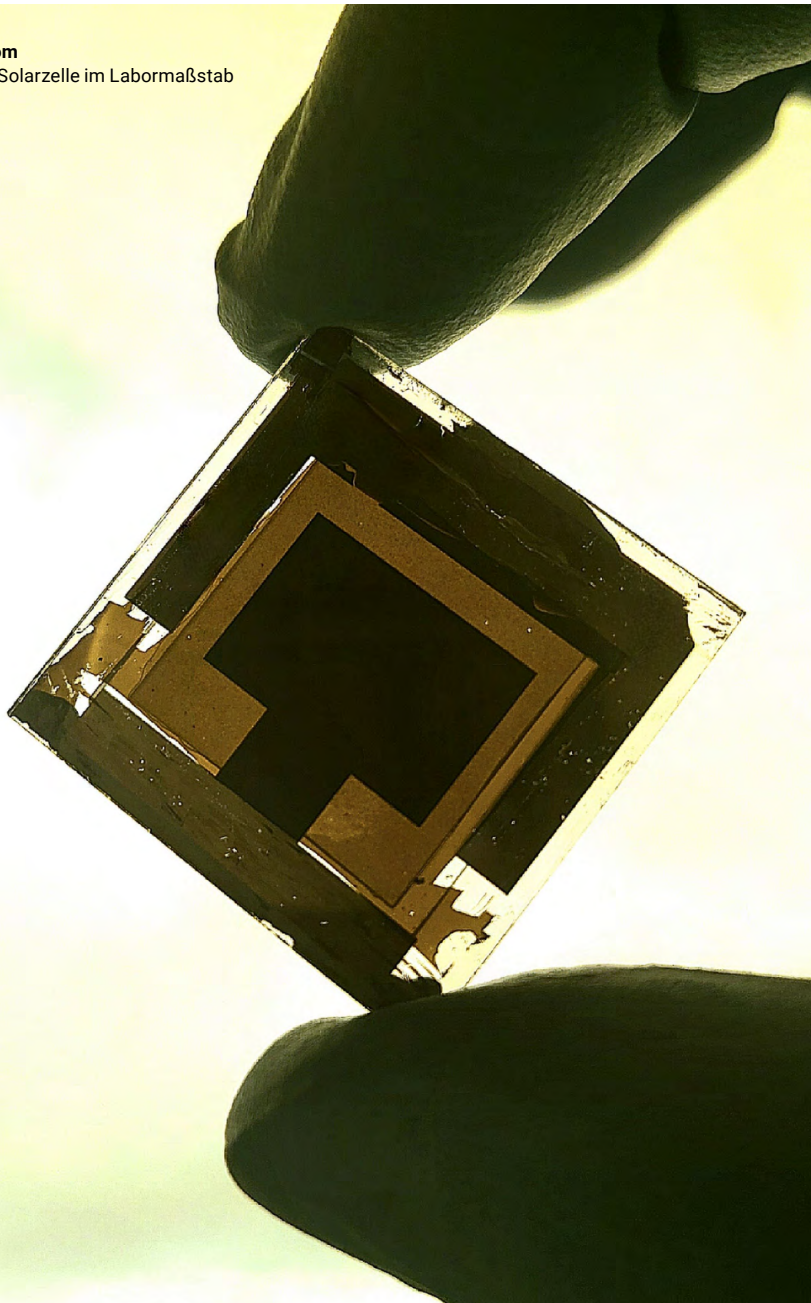


Foto: Institut für Solarenergieforschung GmbH

Tandem-Solarzellen

Stürmische Entwicklungen

Tandem-Solarzellen sind ein Entwicklungstrend bei der Solarenergie, mit dem Ziel, die Effizienz zu steigern. Durch die Kombination von mehreren Solarzellen erweitern sie das Spektrum des ausgeschöpften Sonnenlichtes. Das steigert die Ausbeute an elektrischer Energie gegenüber klassischen Siliziummodulen erheblich. Tandem-Solarzellen bestehen aus mindestens zwei, teilweise auch mehreren übereinander geschichteten Einfach-Solarzellen. Sie werden daher auch Stapel-solarzellen oder Mehrfach-solarzellen genannt. Diese Solarzellen absorbieren das Licht in verschiedenen Wellenlängenbereichen. So nutzen sie das breite Spektrum der Sonne ideal aus.

Der Kompromiss bei den Bandlücken

Jede Solarzelle aus einem einzigen Material muss einen Kompromiss bei der sogenannten elektronischen Bandlücke eingehen: Materialien mit hoher Bandlücke können hochenergetische Photonen aus dem kurzwelligen „blauen“ Bereich des Sonnenspektrums sehr effizient in elektrische Energie umwandeln – niederenergetische Photonen aus dem langwelligen „roten“ Bereich des Sonnenspektrums kann ein solches Material jedoch nicht absorbieren. Umgekehrt kann ein Material mit geringer Bandlücke – wie das heute dominierende Silizium – zwar sehr viele Photonen absorbieren, also einen großen Teil des Sonnenspektrums. Aber ein Großteil der Energie, die die hochenergetischen Photonen transportieren, die also im kurzwelligen Bereich des Sonnenspektrums enthalten ist, wird in Materialien mit kleinen Bandlücken nicht in elektrische Energie umgewandelt, sondern geht als Wärme verloren, sagt Prof. Dr. Robby Peibst. Er forscht seit 2010 am Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH) in Emmerthal und leitet dort seit 2013 die Forschungsgruppe „Solarzellen der nächsten Generation“. Außerdem hat er die Professur „Halbleitertechnologien für nachhaltige Energiesysteme“ an der Leibniz Universität Hannover inne.

Silizium

Kristallines Silizium – wie es in herkömmlichen Solarzellen verwendet wird – hat eine feste Bandlücke von 1,12 eV und kann daher nur rotes und infrarotes Licht effizient zu einem hohen Anteil in Strom verwandeln. Mit dieser Bandlücke kann

Silizium physikalisch maximal etwa 28 % des Sonnenlichts in Strom umwandeln. Das technisch mögliche Maximum der Zellen liegt bei etwa 27 %, die effizientesten verfügbaren Module liegen mit etwa 25 % noch zwei Prozentpunkte darunter.

Bisher haben sich Solarzellen aus Silizium als Marktführer durchgesetzt. Sie sind stabil, zuverlässig und aufgrund der ausgeprägten Wettbewerbssituation preiswert. Prof. Dr. Steve Albrecht, Leiter der Abteilung Perowskit-Tandemsolarzellen am Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH (HZB) und des Fachgebiets Perowskit-Solarzellen an der Technischen Universität Berlin: „Derzeit dominieren Silizium-Solarmodule den Markt zu 95 %: Sie sind inzwischen sehr preiswert, liefern mindestens 25 Jahre lang zuverlässig Strom und haben Modulwirkungsgrade von etwa 22 %“.

Was sind Perowskite?

Um den Wirkungsgrad der Tandemsolarzellen weiter zu verbessern, wird auf das Silizium eine zusätzliche Schicht, meist Perowskit, aufgebracht. Die Forschung an Perowskit-Solarzellen erzielt immer wieder neue Erfolge. Erst 2009 entdeckte eine japanische Forschergruppe um den Ingenieur Tsutumo Miyasaka, dass bestimmte Materialien aus der Klasse der Perowskite gute Halbleiter sind und aus Sonnenlicht Strom erzeugen können.

Perowskite sind keine bestimmten chemischen Stoffe, sondern eine Materi-

alklasse mit einer speziellen Kristallstruktur. Diese Kristalle bestehen aus drei Arten von Atomen oder Molekülen, die mit A, B und X bezeichnet werden. Die Bausteine sind einfach positiv geladene Kationen, wie Methylammonium oder Cäsium, zweifach positiv geladene Kationen wie Blei oder Zinn und einfach geladene Anionen wie Jod, Brom und Chlor.

Die ersten Solarzellen auf der Basis von Perowskit erreichten noch einen Wirkungsgrad von nur 3,8 % – in der Landschaft der Solarzellentechnik nicht nennenswert. Im August 2023 erreichten Forscher bereits einen Wirkungsgrad von 26,1 %. Aufgrund der rasanten Fortschritte beschäftigen sich immer mehr Forschungsinstitute mit Solarzellen unter Einbeziehung des kristallinen Materials.

Wie funktionieren Tandemzellen?

Eine Tandemzelle löst diese Herausforderung, indem sie zwei Materialien kombiniert: ein Material mit großer Bandlücke, das den kurzwelligen Spektralbereich effizient umwandelt, und ein Material mit kleiner Bandlücke, das den langwelligen Bereich des Sonnenspektrums absorbiert. Die beiden Teilzellen teilen das Spektrum auf, wodurch sich der Strom in jeder Teilzelle etwa halbiert. Die Spannungen, die beide Subzellen liefern, addieren sich jedoch, so dass deutlich höhere Wirkungsgrade als mit nur einem Material möglich sind. Bei einem Tandem aus zwei Materialien liegt das theo-



Foto: M.Setzpfandt/ HZB

Solar-Kombi Perowskit-Materialien für PV-Anwendungen kommen in vielfältigen Farben vor, die ihre jeweiligen optischen Eigenschaften widerspiegeln. Dadurch eignen sie sich hervorragend für die Kombination mit anderen Materialien in Mehrfachsolarzellen

retische Wirkungsgradpotenzial bei etwa 45 % im Vergleich zu circa 33 % bei nur einem Material. Es ist möglich, das Konzept weiter zu verfolgen und noch mehr Materialien mit jeweils abgestuften Bandlücken zu kombinieren. Der aktuelle Wirkungsgrad-Weltrekord von 47,6 % wurde mit einer Solarzelle erreicht. Diese enthielt vier verschiedene Materialien, so Peibst vom ISFH, wobei hier auch hochkonzentriertes Licht verwendet wurde.

Die Industrialisierung

Noch kämpfen die Forscherteams mit zahlreichen Problemen. Eines davon ist die Stabilität der Zellen. In der Industrie hat ein Run auf die neuen Produkte ein-



Wärme für Industrie und Kommunen
Schlüsselfertig oder als Contracting

Großwärmepumpen
Solarthermie und mehr



T. +49 174 815 9046

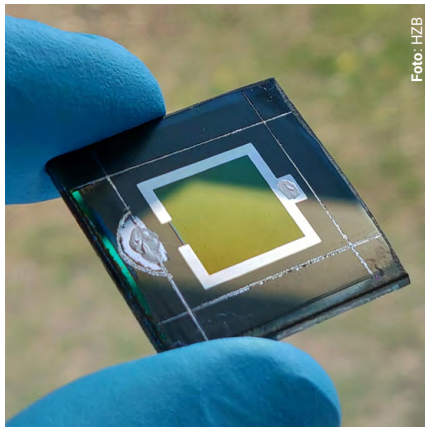
info@savosolar.de



gesetzt: In Brandenburg an der Havel hat das britische Start-up Oxford PV bereits eine erste Produktionslinie aufgebaut. Der Standort ist weltweit der erste für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen mit einer angestrebten Produktionskapazität von 100 MW. Oxford PV ist Pionier und Technologieführer auf dem Gebiet der Perowskit-basierten Photovoltaik mit einem Portfolio von mehreren hundert Patenten. Das südkoreanische Unternehmen Hanwha Qcells will für 100 Millionen Dollar eine Produktionslinie aufbauen, die bis 2026 marktreife Perowskit-Silizium-Tandemmodule herstellen kann. Auch in den USA und China stehen Unternehmen in den Startlöchern. Im Labor erreichen diese Tandemsolarzellen heute Wirkungsgrade von 33,9 %.

Prof. Dr. Stefan Glunz, Abteilungsleiter Photovoltaik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme und für Photovoltaische Energiewandlung an der Universität Freiburg: „Perowskit-Halbleiter haben optimale optoelektronische Eigenschaften, so dass mit Perowskit-Solarzellen sehr hohe Umwandlungswirkungsgrade erreicht werden können. Hohe Wirkungsgrade wiederum ermöglichen es, sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Nachhaltigkeit der Photovoltaik weiter zu verbessern. Deshalb werden Perowskite eine wichtige Rolle in der nächsten Generation der Photovoltaik spielen.“

Perowskit-Solarzellen haben das Potenzial, den Photovoltaik-Markt zu revolutionieren, sagt Prof. Dr. Ulrich Paetzold, Leiter des Bereichs Next Generation Photovoltaics am Karlsruher Institut für Technologie. Die Technologie könne dazu



Dünnschicht-Solar Die CIGS-Perow-Tandemzelle wurde in einer typischen Laborgröße von einem Quadratzentimeter realisiert

beitragen, die Stromkosten weiter zu senken. Allerdings gibt es noch einige technologische Herausforderungen in Bezug auf die Stabilität des Materials und die Produktion der Technologie im großen Maßstab. Skalierbare Produktionsprozesse müssen die Perowskit-Schicht aufgrund der hohen Durchsätze in der Industrie sehr schnell, sehr homogen und fehlerfrei abscheiden. Letzteres sei eine aktuelle technologische Herausforderung, so der Freiburger Hochschullehrer weiter.

Stand der Forschung

Bei den Tandemzellen liegt der Schwerpunkt der weltweiten Forschung derzeit sicherlich auf der Materialklasse der Perowskite, die mit den richtigen Komponenten sehr effiziente Solarzellen ergeben können. Diese Perowskite bieten eine Kombination positiver Eigenschaften: Die Bandlücke der Perowskite lässt sich über

die genaue Zusammensetzung in einem weiten Bereich einstellen, so dass die oben genannten Kriterien für „geeignete Tandempartner“ erfüllt werden können – für verschiedene Tandemkombinationen. So ist es zum Beispiel möglich, Silizium mit der kleinen Bandlücke von 1,12 eV mit einer Perowskit-Topzelle mit einer Bandlücke von ca. 1,7 eV zu einem Tandem zu erweitern, oder auch zwei Perowskite mit unterschiedlichen Bandlücken zu kombinieren. Perowskite absorbieren „ihren“ Teil des Sonnenspektrums sehr effizient, so dass wenige Mikrometer dünne Schichten völlig ausreichend ist. Die Bestandteile der Perowskite sind preiswert und in ausreichender Menge verfügbar. Die genannten hohen Wirkungsgrade werden auch dann erreicht, wenn die Perowskitschichten aus vielen, wenigen 10 bis 100 Nanometer großen Körnern bestehen. Korngrenzen, die bei anderen Materialien wie Silizium die elektronischen Eigenschaften verschlechtern, spielen bei Perowskiten kaum eine Rolle. Deshalb ist es möglich, für die Herstellung der Perowskitschichten sehr kostengünstige Abscheidungsverfahren einzusetzen, die eben solche „körnigen“ oder „polykristallinen“ Schichten erzeugen. Man muss also nicht mehr, wie bei anderen Materialien darauf achten, dass die Schichten „perfekt geordnet“ bzw. „einkristallin“ aufwachsen – was nur mit sehr teuren Verfahren möglich ist. Mit den Perowskiten steht somit erstmals ein „Tandempartner“ für Silizium zur Verfügung, mit dem sich nicht nur gute, sondern potenziell auch kostengünstige Tandemzellen realisieren lassen. Die Abscheidung der Perowskite erfolgt bei niedrigen Temperaturen, so dass Perowskitsolarzellen (ohne Silizium) eine sehr kurze Energierücklaufzeit haben. Demgegenüber stehen die Nachteile einer noch nicht ausreichenden Stabilität und die Notwendigkeit der Verwendung von Blei als Bestandteil der (sehr dünnen) Perowskitschichten, bewertet Tandemsolarzellen-Forscher Peibst die Technik.

Die Frage nach seinen Forschungen beantwortet Peibst mit: „Das ISFH positioniert sich in dem sehr kompetitiven Feld der Perowskit- und Perowskit-Silizium Tandemforschung dahingehend, dass wir unsere langjährige Kompetenz in der Silizium-Technologie und in der Fertigung und dem Testen von Solarmodulen mit neu erworbenen Perowskit-Know-how zu einem kompletten Gesamtpaket kombinieren, das Gesamtsystem „Tan-



Solarforschung Am Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH haben sich mehrere Labore auf die Herstellung von Perowskit-Materialien spezialisiert und setzen dafür unterschiedliche Verfahren ein

demmodul“ mit allen Komponenten optimieren und gerade an der Schnittstelle der einzelnen Technologien neue Beiträge leisten.“

Stabilität

Beispielsweise erfordert die Verbesserung der Stabilität als zentrale Herausforderung der Perowskite eine optimale Auswahl aller in der Solarzelle enthaltenen Materialien. Dazu gehören neben den Perowskiten selbst auch Kontakt- und Zwischenschichten sowie geeignete skalierbare Herstellungsverfahren und eine optimierte Verkapselung der Module. Auch die Stabilität steht in Wechselwirkung mit der angestrebten Tandemstruktur: Ein Extrembeispiel sind die sehr attraktiven Perowskite oder Perowskit-Tandems, die aber gleich mehrere knifflige Stabilitäts Herausforderungen in sich vereinen. Am anderen Ende der Skala stehen 3-Terminal-Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen, zu denen das ISFH mit Partnern bereits viele Beiträge geleistet hat und die mit den derzeit stabilsten Perowskiten kompatibel sind. „Für die industrielle Umsetzung nutzen wir auch unsere Erfahrungen aus dem Siliziumbereich. So arbeiten wir gerade daran, wichtige Schritte der Perowskit-Herstellung in Quarzöfen zu realisieren, die in der Siliziumprozessierung üblich sind und aufgrund der großen Anzahl gleichzeitig prozessierter Wafer einen sehr hohen Durchsatz ermöglichen“, sagt der ISFH-Physiker.

Auch im Tandembetrieb arbeiten sie vertrauensvoll mit Partnern wie dem KIT, dem HZB und dem US-amerikanischen National Renewable Energy Laboratory (NREL) zusammen. In der Kombination der unterschiedlichen Kompetenzen liege auch eine große Stärke, so Peibst über seine Entwicklungen.

Bedeutung der Technologie

Die Bedeutung der Tandem-Technologie hat mehrere Dimensionen: Technologisch ist es eine Wette auf die Zukunft, ob die noch bestehenden Herausforderungen gelöst werden können oder sich als fundamentale Roadblocks erweisen. Ein Scheitern der Perowskit-Tandemtechnologie hält Peibst angesichts der enormen Forschungsanstrengungen weltweit für unwahrscheinlich. Ein ermutigendes Beispiel ist die organische Elektronik, die anfangs ebenfalls mit Stabilitätsproblemen zu kämpfen hatte. Heute sind organische Leuchtdioden (OLEDs) Standard in

Displays und Bildschirmen. Ökonomisch hat die Arbeit an der Technologie für die beteiligten Unternehmen vermutlich schon heute indirekte Vorteile: Wer für sich in Anspruch nehmen kann, bei der Entwicklung des nächsten großen Technologiesprungs gut aufgestellt zu sein, kann dies als Argument bei der Kapitalbeschaffung nutzen – auch wenn die Massenproduktion derzeit noch auf Silizium basiert. Aus ökologischer Sicht ist angesichts der sehr hohen Ausbauraten der Photovoltaik gerade der Aspekt der geringen Energierückzahldauer ein großer potenzieller Vorteil der „All-Perowskit“-Tandemtechnologie. Allerdings sind die Kosten für die Komponenten einer PV-Anlage („Balance of System“ – BOS) auch in Deutschland hoch und müssen durch einen möglichst hohen Energieertrag kompensiert werden – unter anderem proportional zur Anlagenlebensdauer. Insofern ist der Aspekt der geringen Energierückzahldauer eher ein perspektivischer Vorteil, der sich nach ausreichender Verbesserung der Stabilität einstellt.

Gelegentlich werden Spezialanwendungen wie die fahrzeugintegrierte Photovoltaik als erste Anwendung für Tandemsolarzellen genannt, da hier der Platzmangel einen umso höheren Wirkungsgrad erfordert und die Lebensdauer des Fahrzeugs nicht mehr als 25 Jahre beträgt. Hier ist Peibst persönlich skeptisch, da noch einige „Wenn-dies-und-jenes-gelöst-ist – Bedingungen hinzukommen“, so Peibst zur Perspektive der Tandemsolarzellen.

Alternativen

Prof. Dr. Dieter Neher und Dr. Felix Lang von der Universität Potsdam gehen einen anderen Weg. Sie verwenden kein Silizium. Silizium absorbiert langwelliges Licht mit einer kleineren Bandlücke im roten Bereich des Spektrums. Da Silizium ein schlechter Absorber ist, benötigen Silizium-Solarzellen dicke Schichten. Die Herstellung des Siliziums ist zudem mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Es ist jedoch möglich, Tandem-Solarzellen aus zwei Perowskitschichten herzustellen, oder aber auch einen Perowskiten mit einem organischen Halbleiter zu kombinieren. Dadurch verringert sich der CO₂-Fußabdruck bei der Herstellung, da für die Herstellung von Silizium Temperaturen um 1.000 °C erforderlich sind, sowie der Material-Bedarf für sogenannte Dünnschicht-Dünnschicht-Tandems können bei deutlich niedrigeren Tempe-

raturen hergestellt werden. Auf diesem Gebiet arbeiteten die Potsdamer Physiker.

Eine interessante Anwendung sieht der Nachwuchswissenschaftler Lang mit seiner von der Volkswagen-Stiftung geförderten Nachwuchsgruppe in der Raumfahrt. Hier ist das geringe Gewicht dieser hauchdünnen Schichten bei gleichzeitig hoher Effizienz ideal, um Raketen-Start Kosten und Emissionen zu senken. Auf Folie hergestellt sind sogar große Solar-Felder denkbar, die erst im Weltraum auf große Fläche ausgerollt werden. Hier steckt die Technologie noch in den Kinderschuhen. So muss für den infrarot absorbierenden Perowskiten mit geringer Bandlücke Zinn verwendet werden. Dieses Element reagiert mit Sauerstoff, ein Problem für die Anwendung auf der Erde. Auch deshalb schlägt der Physiker zunächst Anwendungen im sauerstofffreien Weltraum vor. Alternativ sollen auch organische Schichten die Funktion des Siliziums übernehmen können. Die organische Schicht absorbiert dann rotes und infrarotes Licht, während Perowskit die blau-grünen Anteile absorbiert. Dabei würden die Perowskite die organische Schicht vor unerwünschter UV-Strahlung schützen. Während die organische Schicht den feuchtigkeitsempfindlichen Perowskit verkapselt.

Fazit

Die Forschung auf dem Gebiet der Tandemsolarzellen ist in vollem Gange. Beträchtlich sind die Forschungsanstrengungen. Für eine breite industrielle Anwendung fehlt es noch an Stabilität. Die Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung steigen durch die dünnen Schichten. ○



Foto: privat

Autor

Dr. Thomas Isenburg
Wissenschaftsjournalist
presse@thomas-isenburg.de