

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

ERNEUERBARE ENERGIEN

Hightech fürs Klima

Perowskite

Senkrechtstarter
bei Solarzellen

Landschaftsästhetik

Bis zum Horizont
und weiter

Biokraftstoffe

Aus Stroh mach
Benzin



Antje Findekle
E-Mail: findekle@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
Sonne, Wind, Wasser und Biomasse gelten als Hoffnungsträger für eine nachhaltige Energieversorgung der Zukunft: Anders als die bisherigen Hauptenergielieferanten Erdöl, Erdgas und Kohle sind sie nicht endlich, sondern theoretisch unbegrenzt verfügbar, und ihre Anwendung geht mit geringeren Umweltgefahren einher als der Einsatz der Kernenergie. Trotz allem müssen aber natürlich auch hier Folgen für die Umwelt und Gesundheit berücksichtigt werden – ebenso wie versteckte Fallstricke, die die positive Ökobilanz womöglich relativieren.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLEITER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findekle
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2017 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

FOLGEN SIE UNS:



04

PEROWSKITE

Senkrechtstarter bei Solarzellen

Perowskite könnten dem Silizium beim Erzeugen von Solarstrom den Rang ablaufen

FOTOLIA / ZLIKOVETS

15

ENERGIEWENDE

Sonnenenergie ist auf Dauer die billigste Energiequelle

Den erneuerbaren Energien sind in Deutschland teils enge Grenzen gesetzt

ISTOCK / ALINAMD

20

LANDSCHAFTSÄSTHETIK

Bis zum Horizont und weiter

Wie beeinflussen Windräder die Ästhetik von Landschaften?

ISTOCK / GYN9038

38

MEERESWÄRMEKRAFTWERKE

Genügend Energie für die ganze Welt

Aus dem Meer ließe sich saubere Energie für die gesamte Menschheit gewinnen

FOTOLIA / FELIXRENAUD

49

BIOKRAFTSTOFFE

Aus Stroh mach Benzin

Forscher wandeln sowohl Stroh als auch Gehölzschnitt in Biokraftstoffe um

ISTOCK / WEBPHOTOGRAPHEER

55

BIOENERGIE

Mit Algensprit ans Ziel

Aus Mikroalgen lassen sich schon heute Biodiesel, Bioethanol und Biogas gewinnen

FOTOLIA / MATEUSZ ZAGORSK

60

WASSERSTOFFTECHNIK

Rosige Zeiten für künstliche Blätter

Technische Fotosynthese ist teuer und kompliziert. Noch?

DREAMSTIME / CHRISTOPHE TESTI

75

ENERGIESPEICHERTECHNIK

Riesige Unterwasserballons sollen Energie zwischenspeichern

Kanadische Firma erprobt Kompressionsspeichersystem für Energie

ISTOCK / BILF

11 SOLARPANEEL FALTET SICH ZUR SONNE

29 GROSSE WINDFARMEN STEHEN SICH SELBST IM WEG

44 ZUKUNFT FÜR EIN SCHMUDELKIND

13 SONNENWÄRMEKRAFTWERK IST TODESFALLE FÜR VÖGEL

31 BAT SHIELD SOLL FLEDERMÄUSE SCHÜTZEN

67 DAS KRAFTWERK IM BERGWERK

28 WINDRÄDER LOHNEN SICH SCHON NACH KURZER ZEIT

33 MEINUNG: KEINE WEITERE WINDKRAFT IM WALD

72 STAUDÄMME IN DEN TROPEN SCHADEN DEM KLIMA



PEROWSKITE

SENKRECHTSTARTER BEI SOLARZELLEN

von Robert F. Service

Perowskite könnten dem Silizium beim Erzeugen von Solarstrom den Rang ablaufen. Im Labor lassen sich damit bereits ähnlich hohe Wirkungsgrade erreichen. Dabei sind sie viel preiswerter.

In Diagrammen, welche die Fortschritte bei den unterschiedlichen Typen von Solarzellen zeigen, sticht eine Kurve eklatant hervor. Über Jahrzehnte hinweg gab es bei allen Fotovoltaikmaterialien – etwa Paneelen mit Wafern aus kristallinem Silizium oder dünnen Filmen aus Cadmiumtellurid – langsame, stetige Verbesserungen. Ein Neuzugang beeindruckte jedoch mit einem rasanten Schnellstart. Das Material namens Perowskit betrat die Szene erst 2009 mit Zellen, deren Wirkungsgrad gerade einmal 3,8 Prozent betrug – ein mickriger Wert angesichts der 25 Prozent, die Spitzensiliziumzellen im Labor erreichten. Bis Ende 2011 hatte er sich jedoch auf 6,5 Prozent fast verdoppelt, und 2012 kletterte er auf 10 Prozent. Als er 2013 die 15-Prozent-Marke knackte, überholte er damit Konkurrenten, die jahrzehntelang optimiert wor-

den waren. Im April 2014 meldeten Forscher auf einem Kongress in San Francisco schließlich den neuesten Rekordwert von knapp 20 Prozent.

Und das Material hat weitere Vorteile. Perowskite lassen sich aus leicht erhältlichen Substanzen herstellen. Im Gegensatz zu manchen anderen Solarzellen sind sie zudem einfach und preiswert zu produzieren. Aber was vielleicht das Beste ist: Verbindet man Perowskit-Solarzellen mit Siliziumpaneelen, sollten Tandemzellen mit Wirkungsgraden deutlich über 30 Prozent entstehen. »Es gibt eine Woge der Begeisterung, und sie breitet sich immer weiter aus«, schwärmt Michael McGehee, Werkstoffkundler an der Stanford University (Kalifornien).

Allerdings sind die meisten Perowskitzellen bisher nicht größer als eine Briefmarke und erzeugen nur wenige Milliam-

pere an elektrischem Strom. Außerdem zersetzen sie sich an der Luft, und die besten enthalten das giftige Blei. Doch die Forscher sind zuversichtlich, dieses Problem zu meistern. Bisher gibt es nur einige Dutzend Veröffentlichungen über die neuen Zellen, die von einer Hand voll Forschungsgruppen stammen. »Das dürfte sich bald ändern. Die Leute stürzen sich auf das Gebiet«, meint McGehee. Anhand seiner vielfältigen Kontakte mit Kollegen schätzt er, dass sich mittlerweile mehr als 100 Teams mit Perowskiten beschäftigen.

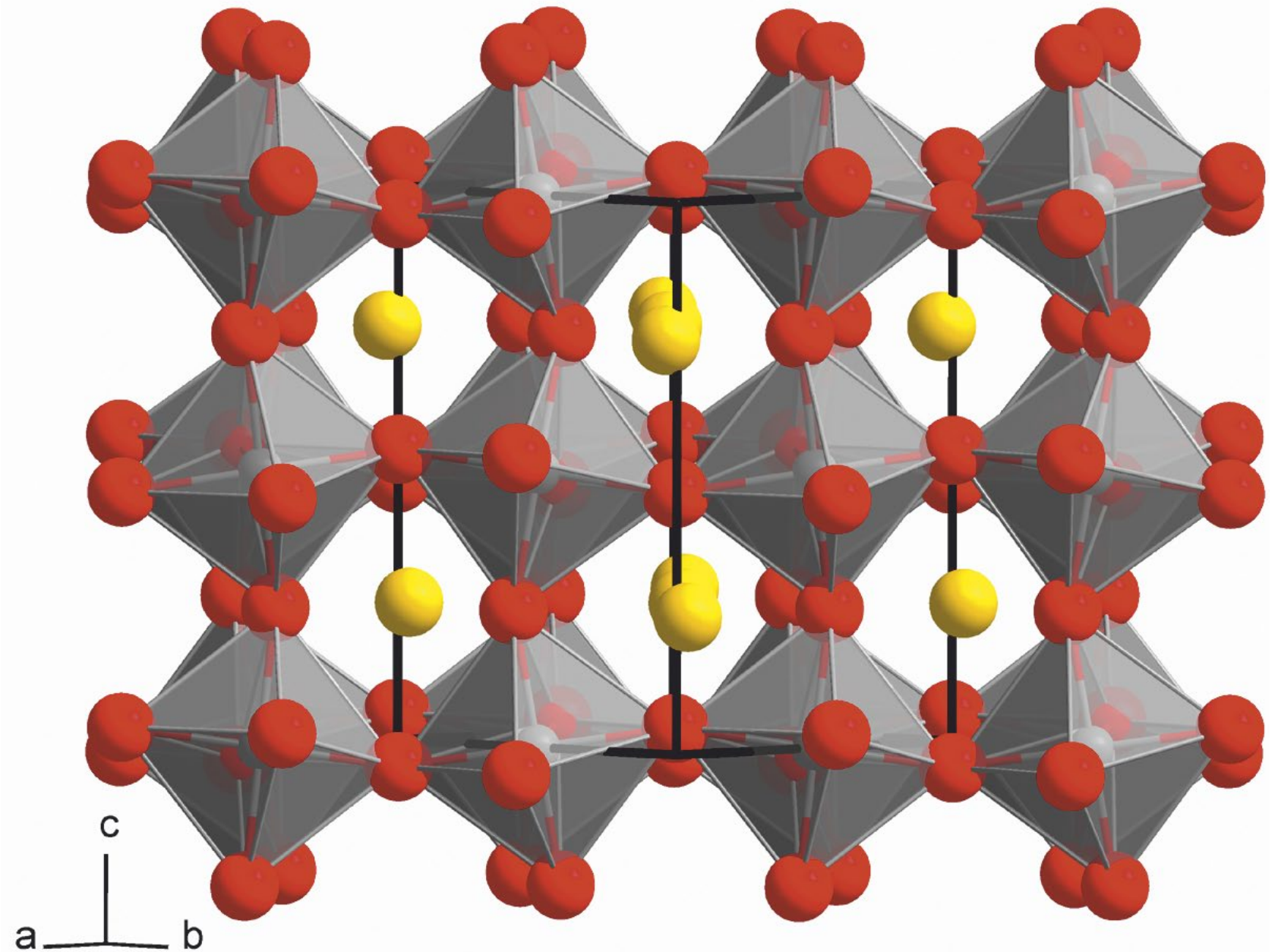
Der richtige Mix

Dabei ist die Stoffgruppe schon seit Langem bekannt. Ein russischer Mineraloge entdeckte den ersten natürlich vorkommenden Perowskit bereits 1839. Inzwischen existieren hunderte Varianten. Die Bezeichnung charakterisiert alle salzarti-

gen Stoffe mit einer bestimmten Kristallstruktur. In ihr bilden die Anionen Oktaeder, die über die Ecken in allen drei Raumrichtungen miteinander verbunden sind. Bei den Exemplaren für Solarzellen handelt es sich um Halbleiter. Doch die Spanne reicht von metallischen Leitern bis zu Isolatoren, wobei die berühmtesten Vertreter jene Kupferoxid-Hochtemperatursupraleiter sind, die 1986 für Aufsehen sorgten.

In den 1990er Jahren verfertigte der Physiker David Mitzi am Thomas J. Watson Research Center der Firma IBM in Yorktown Heights (New York) Dünnschichttransistoren und LEDs (Licht emittierende Dioden) aus einem halbleitenden Perowskit. Die Geräte funktionierten. Obwohl viele Licht emittierende Materialien auch gute Absorber sind – und damit potenziell geeignet für Solarzellen –, schätzte der Forscher seine Perowskite aber als zu instabil für die Fotovoltaik ein, bei der sie Jahrzehnte unbeschadet überdauern müssen, um eine Chance als kommerzielle Produkte zu haben.

Knapp zehn Jahre später versuchte sich Tsutomu Miyasaka an der Lösung des Stabilitätsproblems. Der Chemiker von der Toin-Universität in Yokohama (Japan) arbei-



tete zusammen mit Kollegen an so genannten Farbstoffsolarzellen, die nach ihrem Erfinder Michael Grätzel von der Eidgenössischen Technologischen Hochschule in Lausanne auch Grätzelzellen genannt werden. Sie enthalten in einem Elektrolyten winzige anorganische Partikel – meist aus

STRUKTUR VON PEROWSKITEN

Als Perowskite bezeichnet man Salze mit einer besonderen Kristallstruktur. Die Anionen (rot) ordnen sich darin zu Oktaedern an, die über ihre Ecken verknüpft sind. Eine Sorte von Kationen (grau) befindet sich im Zentrum der Oktaeder, die andere (gelb) zwischen ihnen.

Titandioxid –, die mit einem organischen Farbstoff beschichtet sind. Wenn ein Farbstoffmolekül ein Photon absorbiert, geht ein Elektron in einen angeregten Zustand über, von dem es auf das Titandioxidteilchen springt. Anschließend hüpfte es so lange von Partikel zu Partikel, bis es zu einer Elektrode gelangt und von dort in den Stromkreis eintritt. Zum Ausgleich wechselt ein anderes Elektron von dem Elektrolyten zum Farbstoff und überführt diesen wieder in den Ausgangszustand.

Verbesserungen im Eiltempo

Das Problem ist laut Grätzel, dass der Farbstoff nicht jedes Photon absorbiert, das darauf trifft, was den Wirkungsgrad verringert. Hier erhoffte sich Miyasaka von den Perowskiten eine Verbesserung. Laut eigenem Bekunden brauchte einer seiner Mitarbeiter zwei Jahre zur Entwicklung eines Rezepts, um das Material zumindest stabil genug für eine kurze Demonstration zu machen. Am 6. Mai 2009 stellte die Gruppe im »Journal of the American Chemical Society« ihre neuen Solarzellen vor, die statt des Farbstoffs eine dünne Schicht aus einem lichtabsorbierenden Perowskit enthielten. Der Wirkungsgrad betrug

3,8 Prozent. Allerdings funktionierten die Zellen immer nur kurz; denn der verwendete Flüssigelektrolyt löste den Perowskit innerhalb weniger Minuten auf.

Den nächsten Schritt unternahm Grätzel zusammen mit Nam-Gyu Park und seinen Kollegen an der Sungkyunkwan-Universität in Suwon (Südkorea). Sie ersetzten den Flüssig- durch einen Feststoffelektrolyten und erreichten so einen Wirkungsgrad von knapp zehn Prozent, worüber sie am 21. August 2009 im Fachmagazin »Scientific Reports« berichteten. Damit begann die Geschichte interessant zu werden.

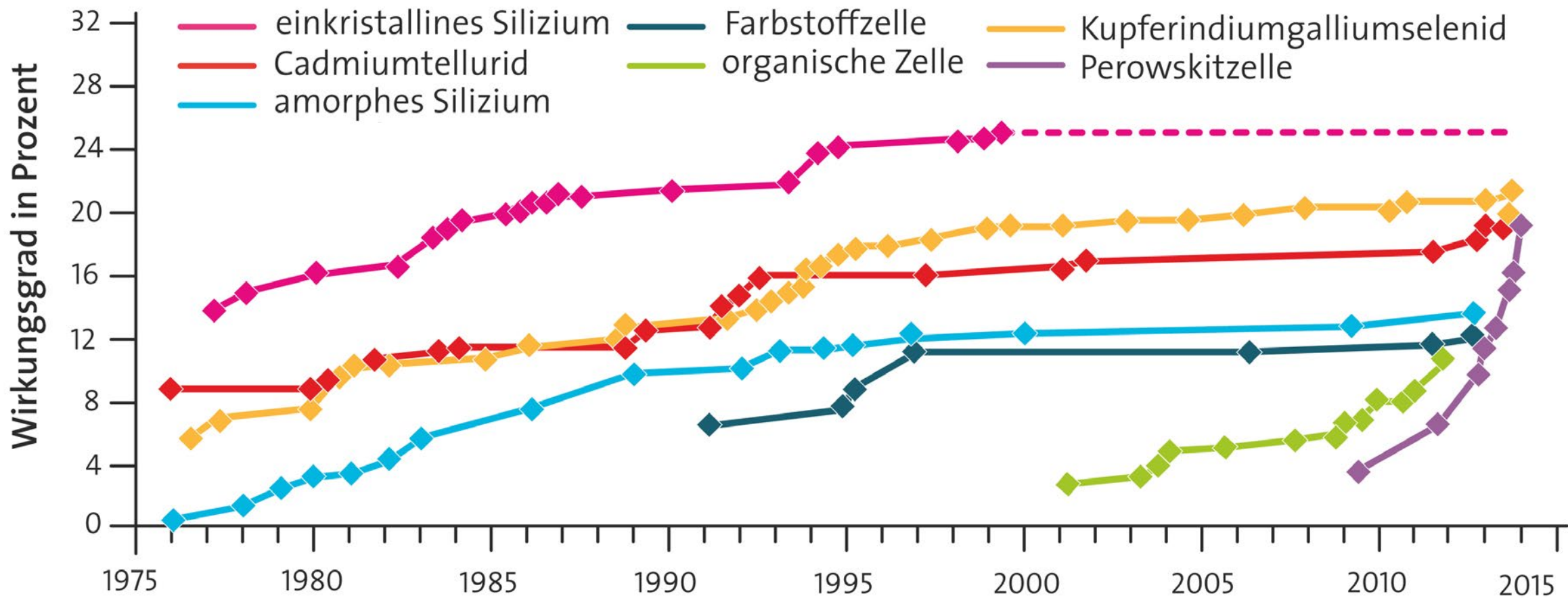
Als Nächstes suchte Grätzel nach besseren Züchtungsmethoden für das Material. Bisher hatten seine Gruppe und andere Forscher einfach die Ausgangssubstanzen in einem Lösungsmittel zusammengemischt und die Flüssigkeit abgedampft. Dabei kristallisieren die Perowskite aus. Auf diese Weise entstehen jedoch Teilchen ganz unterschiedlicher Form und Größe. Um den Vorgang besser steuern zu können, gingen Grätzel und seine Kollegen zu einem zweistufigen Verfahren mit zwei verschiedenen Lösungsmitteln über. Das Ergebnis waren gleichmäßigere Überzüge der Titandioxidpartikel. Zugleich schnellte der Wirkungs-

grad auf 15 Prozent empor, wie die Gruppe am 18. Juli 2013 bekannt gab.

Derweil machte Henry Snaith, der zuvor bei Grätzel gearbeitet hatte, an der University of Oxford (England) eine weitere Entdeckung. Sein Team wollte wissen, ob das Titandioxid eine entscheidende Rolle spielte, und ersetzte es deshalb durch ein poröses Aluminiumoxid, das keine Ladungen zu transportieren vermag. Die Forscher erwarteten deshalb, dass die Zelle nicht mehr funktionieren würde. Doch das Gegenteil war der Fall: Sie arbeitete besser als zuvor.

Damit war klar, dass der Perowskit nicht nur als Lichtabsorber diente, sondern auch als Halbleiter Ladungen transportieren konnte. Wozu sich also mit Titandioxid oder Aluminiumoxid abgeben, dachten die Forscher und erzeugten einfach durch Gasphasenabscheidung dünne Filme ihres Perowskits, die sie zwischen die Elektroden einbettete. Der Wirkungsgrad lag auch in diesem Fall bei 15 Prozent.

Den aktuellen Rekordwert von 19,3 Prozent erzielte Yang Yang von der University of California in Los Angeles. Seine Arbeitsgruppe optimierte den Züchtungsprozess für Perowskit weiter und sorgte so dafür, dass weniger Kristalldefekte auftraten, die



NACH: PABITRA K. NAYAK, WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

elektrische Ladungen einfangen. Zugleich verbesserte er die Grenzflächen zwischen dem Material und benachbarten Schichten. Mit ähnlichen Maßnahmen hatte Park zuvor bereits einen Wert knapp über 17 Prozent geschafft.

Günstige Eigenschaften

Was ist der Grund für die rasanten Fortschritte? Zum großen Teil liege es wohl daran, dass Perowskite generell nur wenige Fehlstellen in ihrem Kristallgitter aufwei-

sen, meint der Werkstoffkundler David Cahen vom Weizmann-Institut in Rehovot (Israel). Diese Eigenschaft teilen sie mit anderen Spitzenmaterialien für Solarzellen wie Galliumarsenid und kristallinem Silizium. Bei Letzterem erfordert es allerdings extrem hohe Temperaturen beziehungsweise Apparate im Wert von mehreren Millionen Euro, um weitgehend defektfreie Kristalle zu züchten. Perowskite dagegen lassen sich in fast perfekter Form einfach bei 80 Grad Celsius aus einer Lösung abscheiden.

WIRKUNGSGRAD VRSCHIEDENER SOLARZELLTYPEN

Vergleicht man die Steigerung des Wirkungsgrads der verschiedenen Solarzelltypen seit 1975, stechen die erst 2009 entdeckten Perowskitzellen durch einen besonders steilen Anstieg hervor.