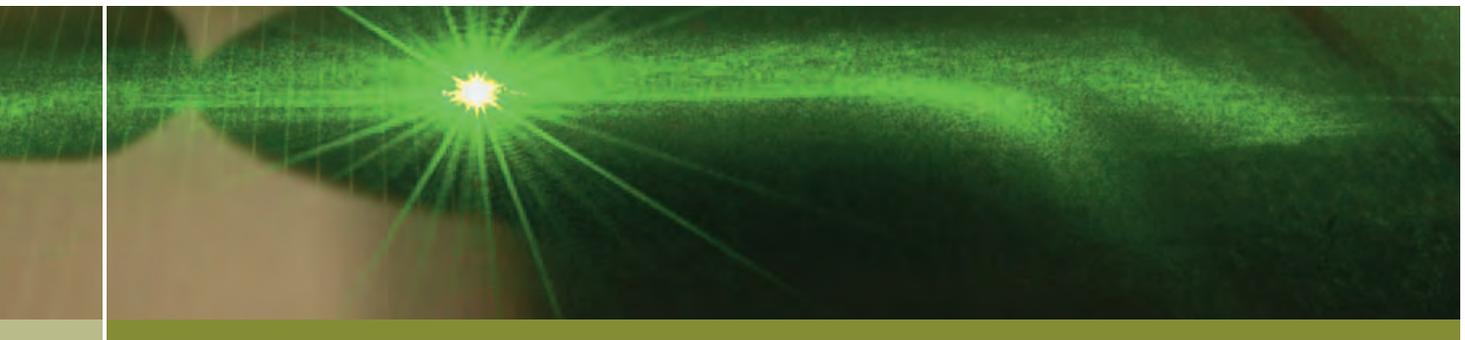


Solarzellen aus Silizium

Schritt für Schritt zu höheren Wirkungsgraden und Erträgen



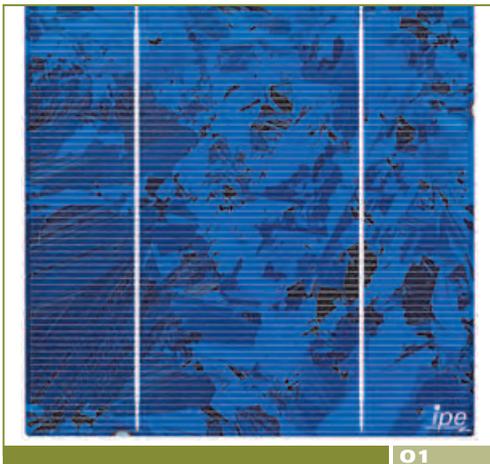
Von allen Möglichkeiten, mit Erneuerbaren Energien Strom zu erzeugen, hat die Photovoltaik das größte Potential. Theoretisch würden allein die (gesamten) 3000 Quadratkilometer Dachflächen von Deutschland ausreichen, um im Jahresmittel den gesamten deutschen Strom zu erzeugen – mit dem gegenwärtigen technischen Stand der Photovoltaik. Natürlich ist dieses Bild optimistisch: Zum einen können nicht die ganzen Dachflächen benutzt werden, weil Dachfenster, Kamine und solarthermische Anlagen mit der Photovoltaik konkurrieren, und schließlich sind nicht alle Dächer optimal unverschattet nach Süden orientiert. Dennoch, wenn auf die 800 Quadratkilometer günstig gelegenen Dachflächen ca. 100 GW Photovoltaikmodule aufgeständert würden, dann ließen sich (je nachdem, wie die technische Entwicklung bei Speichern weitergeht), etwa 10 bis 20 Prozent des deutschen Stromes mit Photovoltaik bereitstellen. Bei Verwendung von noch mehr Fläche wäre noch mehr möglich.

Heutige Module mit Solarzellen aus kristallinem Silizium haben Wirkungsgrade um 15 Prozent, die darin verschalteten Zellen erzielen in der industriellen Massenproduktion bei sehr guten Herstellern etwa 17 Prozent. Allerbeste und kleinflächige

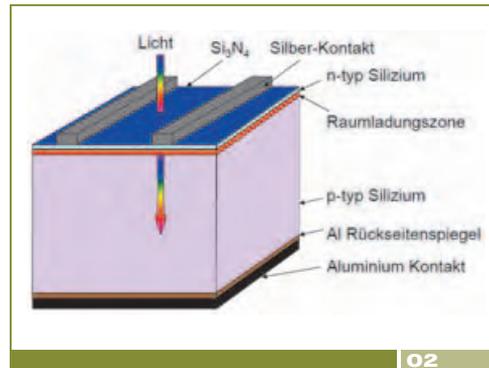
(2 x 2 cm²) Laborzellen haben Wirkungsgrade bis ca. 25 Prozent. Solche Höchstwerte bei Laborzellen erfordern aber einen enormen technologischen Aufwand; großflächig und wirtschaftlich herstellbar in industriellem Maßstab sind diese Zellen

SUMMARY

The direct conversion of solar energy into electricity, i.e. photovoltaics, offers the highest potential of providing electrical energy among the various renewable energy sources. Nowadays photovoltaic modules with crystalline silicon solar cells present power conversion efficiencies of 15 percent, small high-efficiency cells in the research laboratory reach up to 25 percent. For delivering electrical energy from photovoltaics below 20 cent/kWh, the solar cell efficiencies must rise. At the same time, low-cost and fast manufacturing methods with low energy consumption are needed, and the wafer thickness must further shrink. Targeting those challenges, the Institut für Physikalische Elektronik (ipe) develops technologies and concepts of advanced industrial solar cells. Improvements and cost savings arise from integrating thin film as well as laser technologies with the actual manufacturing methods based on screen printing.



Multikristalline Solarzelle mit einer Kantenlänge von 15,6 Zentimetern. Die unterschiedliche blaue Farbe ist eine Folge unterschiedlicher Dicke der ca. 80 Nanometer dicken Siliziumnitrid-Frontseitenpassivierung, die je nach Oberflächenorientierung der Kristallite etwas unterschiedlich dick wächst. Das Kontaktgitter wird mit Hilfe von Siebdrucktechniken aufgebracht.



Aufbau einer Solarzelle aus kristallinem Silizium. Die Raumladungszone zwischen dem n-Typ und p-Typ Silizium ist entscheidend für die Trennung der durch das eingestrahlt Sonnenlicht erzeugten Ladungsträgerpaare. Blaue Strahlung wird direkt unter der Oberfläche der Zelle absorbiert, rotes Licht dringt tief in die Zelle ein und muss an der Rückseite möglichst noch einmal zurück in die Zelle gespiegelt werden. Zur Herstellung des pn-Übergangs dient üblicherweise eine Eindiffusion von Phosphor in einem Ofen; im Gegensatz dazu verwendet das ipe einen Laserprozess.

nicht. Wenn der Photovoltaik-Strom in wenigen Jahren unter ca. 20 Cent pro Kilowattstunde kosten soll, dann wird man dieses Ziel nur erreichen, wenn **i)** man die Wirkungsgrade von großflächigen (15,6 x 15,6 cm²) hergestellten Zellen auf etwa 20 Prozent Wirkungsgrad steigert, **ii)** man dabei nur sehr kostengünstige, schnelle Techniken einsetzt, **iii)** diese Herstelltechniken selbst nur wenig Energieeinsatz erfordern, **iv)** die Zellen noch dünner werden (z. B. 150 statt 180 µm) und **v)** die Zellen in sehr hohen Stückzahlen in einer hoch automatisierten Massenproduktion hergestellt werden können.

(01) zeigt eine typische blau schimmernde Industrie-Solarzelle mit den Silber-Kontaktfingern auf der Vorder- und dem Aluminium-Kontakt auf der Rückseite. Licht tritt auf der Vorderseite zwischen den metallfreien Stellen in die Zelle ein. Die Antireflexschicht aus Siliziumnitrid (Si₃N₄), welche die Zelle blau erscheinen lässt, und eine zusätzliche Oberflächenrauigkeit,

die „Textur“, sorgen für einen möglichst hohen Lichteinfall. Die durch Photonen erzeugten Elektronen/Loch-Paare trennen sich im elektrischen Feld der Raumladungszone zwischen dem n-Typ „Emitter“ und der p-Typ „Basis“, also am pn-Übergang der Silizium-Diode. Die Elektronen laufen in Richtung Vorderseite, die Löcher in Richtung Rückseite; ein Teil der Ladungsträger rekombiniert leider und geht so verloren. Die Rekombinationsgeschwindigkeit verringert sich mit einer verbesserten Oberflächen-Passivierung der Solarzelle und natürlich mit der Qualität des Siliziums und seiner Dotierung.

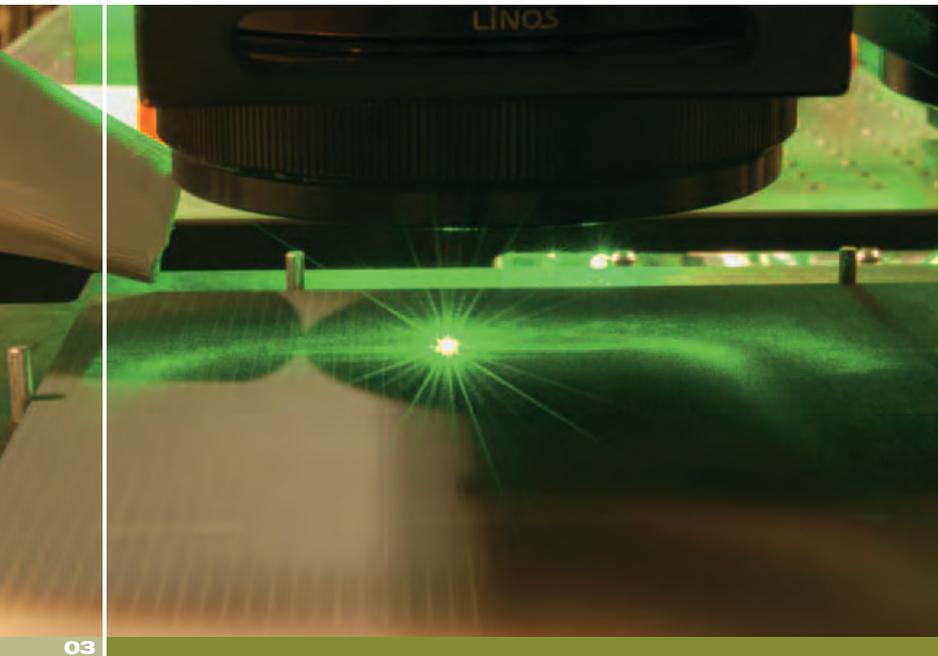
Das Institut für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart (ipe), das jahrelang eines der weltweit führenden Institute im Bereich der Dünnschichtphotovoltaik („zweite Generation Photovoltaik“) war, hat vor etwa drei Jahren damit begonnen, spezielle Technologien und Konzepte für solche industriellen Solarzellen aus kristallinem Silizium („erste Generation Photovoltaik“)

zu entwickeln. Die Stärke des Institutes liegt darin, dass Konzepte der Dünnschichttechniken (Abscheiden aus der Gasphase oder Vakuum), die bisher der „zweiten Generation“ Photovoltaik vorbehalten waren, auf die „erste Generation“ angewandt werden. Jedenfalls erscheint es möglich, die 20 Prozent Wirkungsgrad für großflächige (15,6 x 15,6 cm²) Zellen tatsächlich zu erreichen. Zusätzlich arbeitet das Institut auch an Konzepten der „dritten Generation“, d. h. an Versuchen, mit Hilfe der *Photonik* die Wirkungsgrade noch weiter zu steigern. Vielleicht entsteht so aus der Kombination von Techniken verschiedener „Generationen“ in Zukunft eine Photovoltaik „erster Klasse“ industrieller Zellen. Neben der Forschung an neuen Zelltechnologien arbeitet das *ipe* auch an der Vermessung von ganzen Solarmodulen und Photovoltaikanlagen.

dieren von Phosphor in die mit Bor p-Typ dotierte Siliziumziumscheibe, die „Basis“, hergestellt. Der Diffusionsprozess findet in einem Diffusionsofen über eine typische Zeit von 30 Minuten bei einer typischen Temperatur von 900 °C statt. Der Prozess ist deshalb energie- und zeitaufwändig.

(03) zeigt, wie das *ipe* den pn-Übergang mit einem gepulsten Laser herstellt, anstatt einen Ofenprozess zu verwenden. Hierzu wird auf die Oberfläche einer Siliziumscheibe, zunächst eine hauchdünne Phosphorschicht aufgebracht. Anschließend heizt ein circa eine Milliardstel Sekunde kurzer Laserpuls die Siliziumschicht in einer Tiefe von weniger als einem Millionstel Meter auf über 2000 °C auf; der Rest der Siliziumscheibe bleibt kalt. Der Phosphor an der Oberfläche mischt sich mit dem bei dieser Temperatur flüssigen Silizium und wird dann in Sekundenbruchteilen in das kristallisierende Silizium eingebaut. Für die Qualität der Solarzelle ist es entscheidend, dass der Laser nur auf einen etwa fünf Mikrometer breiten (aber einige Zentimeter langen) Streifen fokussiert ist; nur so gelingt die Herstellung des pn-Übergangs in dem patentierten Verfahren völlig defektfrei. Der entscheidende Herstellungsprozess der Solarzelle dauert an jeder Stelle der Solarzelle nur etwa 0,1 Mikrosekunden. Der Laser wird deshalb Schuss für Schuss im zeitlichen Abstand von weniger als einer zehntausendstel Sekunde über die Oberfläche der Siliziumscheibe gerastert. Durch die beschleunigte Entwicklung neuer Lasertypen ist es möglich, neue Halbleiterprozesse auch für Großflächen-Elektronik wirtschaftlich zu gestalten. So ist es möglich, auch große Solarzellenflächen in sehr kurzer Zeit zu bearbeiten. Der industrietaugliche Prozess eignet sich besonders für in Zukunft immer dünner werdende Solarzellen.

Mit dieser *ipe*-Technologie hergestellte, kleinflächige Solarzellen liefern bisher Wirkungsgrade von bis zu 19 Prozent. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Laser-, Optik-, Automatisierungs- und Solarfirmen arbeitet das *ipe* jetzt an der Industrialisierung des Prozesses, der die Herstellkosten von Solarzellen weiter senken wird.



Herstellung eines pn-Übergangs mit Hilfe des Lasers. An den Stellen, an denen später die streifenförmigen Frontkontakte (siehe (01)) aufgebracht werden, sorgt der Laser als Folge der Prozessführung für eine besonders hohe Dotierung („selektiver Emitter“) und verringert so den Kontaktwiderstand zwischen den Metallkontakten und dem Halbleiter, was zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades führt. Bei industriellen Solarzellen erzielt das *ipe* auf diese Weise bis zu 18 Prozent Wirkungsgrad.

1. Laserdotieren: 0,4 Prozent mehr Wirkungsgrad

(02) zeigt den prinzipiellen Aufbau von Solarzellen aus kristallinem Silizium. Bei der konventionellen industriellen Herstellung von Solarzellen aus einkristallinem und multikristallinem Silizium erzeugt ein Hochtemperaturschritt den Solarzellen „emitter“, der den für die Funktionsweise der Solarzelle entscheidenden „pn-Übergang“ darstellt. Dieser wird in den allermeisten Fällen durch Eindiffun-

Viel wichtiger als dieser Weltrekordwirkungsgrad für Solarzellen, deren pn-Übergang *überall* mit dem Laser hergestellt ist, ist die Erzeugung eines so genannten „selektiven“ Emitters. Hierbei dient der Laser „nur“ dazu, um unter den metallischen Kontaktfingern an der Vorderseite der Solarzelle besonders viel Phosphor einzudiffundieren. Dabei wird der elektrische Kontaktwiderstand verbessert und die Verluste, die bei der Ableitung des Solarzellenstroms entstehen, reduziert. Das Konzept des „selektiven Emitters“ ist zwar bereits seit über 20 Jahren bekannt, jedoch verhinderten seither teure und komplizierte Herstellungsschritte eine industrielle Umsetzung. Basierend auf dem Laserdotierprozess hat das *ipe* jetzt ein einfaches Verfahren entwickelt, das in einer konventionellen Solarzellenherstellung mit nur einem zusätzlichen Prozessschritt eine selektive Emitterstruktur erzeugt und gleichzeitig alle vorausgehenden und nachfolgenden Prozessschritte beibehält. Hierbei nutzt der Laserdotierprozess eine dünne Phosphor-haltige Schicht auf der Solarzellenoberfläche, welche ohnehin automatisch in einem vorangegangenen Fertigungsschritt entsteht. Weil der Laserstrahl exakt auf jede beliebige Stelle der Solarzelle gezielt eingestrahlt werden kann, können wir auch nur dort Phosphor eindiffundieren, wo er benötigt wird, nämlich genau *unter* den Kontaktfingern. *Zwischen* den Kontaktfingern soll die Dotierung niedrig sein, um die Lebensdauer der durch das Licht erzeugten Ladungsträger nicht durch die sogenannte, dotierungsabhängige „Auger“-Rekombination zu verringern. In Zusammenarbeit mit einem Solarzellenhersteller ist es uns gelungen, allein mit dem Konzept des „selektiven Emitters“ den Wirkungsgrad von industriellen Solarzellen um über 0,4 Prozent von 17,5 auf 18 Prozent zu steigern.

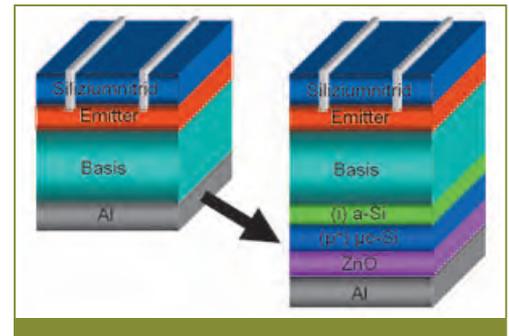
2. Andere Rückseite: 0,8 Prozent mehr Wirkungsgrad

Wie in (02) und der linken Seite von (04) gezeigt, weisen konventionelle industrielle Solarzellen eine vollflächig siebgedruckte und gefeuerte Aluminium-Rückseite (Al) auf. Dieser Rückkontakt weist zwei signifikante Nachteile auf. **i)** Die Reflexion für noch nicht im Silizium absorbierte Strahlung ist schlecht, was einen Stromverlust nach sich zieht. **ii)** Die Passivierungsqualität

(das heißt die Absättigung der offenen Gitterbindungen an der Silizium-Oberfläche) ist mangelhaft, was sich in Spannungsverlusten durch Rekombination bemerkbar macht. Beide Faktoren limitieren den Wirkungsgrad der Solarzelle.

Wir haben die industrielle Al-Rückseite durch eine so genannte „Hetero“-Rückseite ersetzt, die an der Schichtstruktur im Bild erkennbar ist. Die neuartige Rückseite basiert auf einem Schichtsystem aus undotiertem (intrinsischen) amorphem (i) a-Si und hochdotierten mikrokristallinem (p⁺) μ c-Si Silizium. Dabei ist die (i) a-Si Schicht für die Absättigung der Silizium-Oberflächenbindungen verantwortlich, was im Gegensatz zur industriellen Al-Rückseite eine Erhöhung der Spannung bedeutet. Die (p⁺) μ c-Si Schicht wirkt als elektrischer Spiegel, der die Ladungsträger von der rekombinationsbehafteten Rückseite abhält. Analog dazu fungiert die ZnO-Schicht als optischer Spiegel, der im Gegensatz zur Industrierrückseite höhere Zellströme liefert. Ein aufgedampfter Al-Rückkontakt komplettiert die neuartige Rückseite. Darüber hinaus basiert das gesamte Schichtsystem auf Niedertemperaturprozessen, die den industriellen Hochtemperatur-Feuerschritt umgehen. Somit verbessert das optimierte Rückseitenkonzept die beiden oben angeführten Schwachstellen eines industriellen Rückkontakts.

Ausgangspunkt für die Rückseitenoptimierung ist eine auf monokristallinem Silizium basierende industriell prozessierte Solarzelle mit einer standardmäßig siebgedruckten und gefeuerten Al-Rückseite, die einen Wirkungsgrad von 16,6 Prozent aufweist. Der Austausch des industriellen Rückkontakts durch die optimierte Heterorückseite ermöglicht aufgrund von Spannungs- und Stromgewinnen eine absolute Wirkungsgradsteigerung von +0,8 Prozent. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits vergleichsweise einfache Zelloptimierungen den Wirkungsgrad von heute käuflich zu erwerbenden Siliziumsolarzellen deutlich verbessern können, was wiederum einen finanziellen Gewinn in Millionenhöhe für das jeweilige Solarunternehmen bedeutet.



Die Solarzelle auf der linken Seite hat einen ganzflächigen Rückseitenkontakt aus (siebgedrucktem) Aluminium. Der Rückseitenkontakt auf der rechten Seite steigert den Wirkungsgrad um bis zu 0,8 Prozent. Die Schichtfolge sorgt nicht nur dafür, dass rotes und infrarotes Licht (siehe (02)) von der Rückseite besser in die Zelle hinein zurückgespiegelt (und dann absorbiert) wird, sondern auch für eine verbesserte Lebensdauer der durch das Licht angeregten Elektron/Lochpaare. Auf diese Weise steigt der Wirkungsgrad der Zelle.

3. Verbesserte Frontgitter: 0,4 Prozent mehr Wirkungsgrad

Auch in der Optimierung der gitterartigen Fingerstruktur auf der Vorderseite steckt noch viel Potential: Je größer die Zahl und je breiter die Finger auf der Vorderseite sind, umso geringer ist der Widerstand im Kontaktgitter, umso geringer sind also die *elektrischen* Verluste. Die breiten Finger mit hoher Zahl erhöhen aber auch die *Ab-schattung* und treiben deswegen die *opti-schen* Verluste nach oben. Das optimale

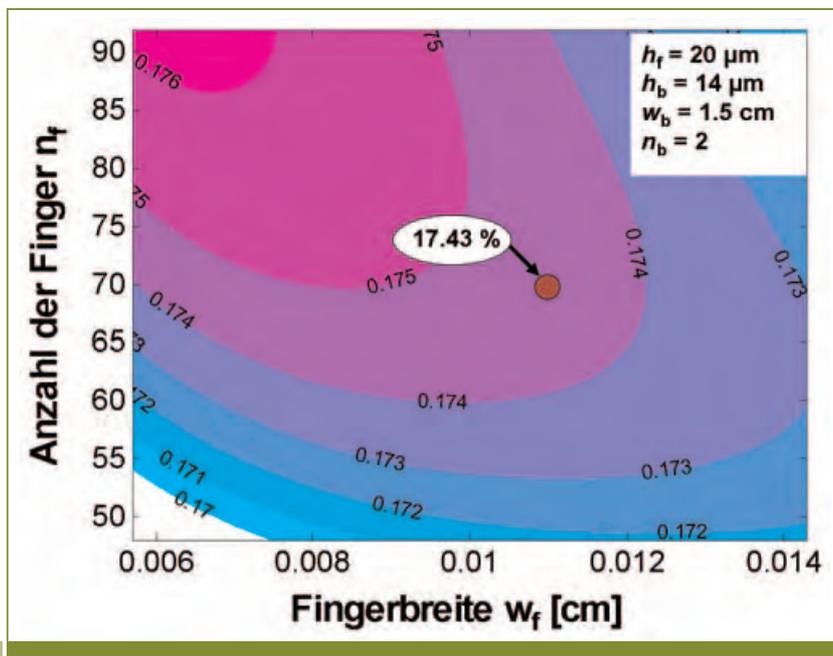
ändertes Design des Frontgitters eine 17,4 Prozent-Solarzelle herstellen.

Die Zukunft liegt in einer „Feinlinienmetal-lisierung“ mit einer zusätzlichen galvanischen Abscheidung auf den vorhandenen Fingern. Damit wäre zwar ein zusätzlicher Schritt in der Industrieproduktion nötig; aber bei einem zu erwartenden Wirkungs-gradgewinn von absoluten 0,4 Prozent ist dies sicherlich ein lohnender Schritt. In Kooperation mit einer Firma findet derzeit der Aufbau einer Silber-Galvanisierungs-anlage am *ipe* statt.

4. Photonik erspart teure Solarzellenflächen

Die konventionelle Photovoltaik „bedeckt die Welt mit Silizium“, d. h. sie versucht, die Solarzellen dorthin zu stellen, wo das Licht hinkommt. Man kann auch umge-kehrt vorgehen: das Licht dorthin zu len-ken, wo die Solarzellen sind. Eine solche Vorgehensweise ist möglich, wenn man das Licht mit Spiegeln oder durch Linsen ablenkt; solche Systeme sind aber leider zu teuer. Einen Ausweg bieten möglicher-weise Fluoreszenzkollektoren (FluKos). Solche FluKos konzentrieren einfallendes Licht durch Streuung. Da sie Licht aus allen Richtungen einsammeln, eignen sie sich für ein konzentrierendes photovoltaisches System, das *nicht* nachgeführt werden muss.

FluKos bestehen aus Acrylglasplatten, die mit Fluoreszenzfarbstoffen angereichert sind. Wie in (06) gezeigt, absorbieren diese Farbstoffe einfallende Strahlung eines Energiebereichs und emittieren Photonen in einem anderen Energiebereich. Das spektrale Absorptions- und Emissionsver-halten ist charakteristisch für das verwendete Material und bestimmt dessen Farbe. Die Strahlungsemission eines jeden Farb-stoffmoleküls erfolgt gestreut in alle Rich-tungen. Das führt dazu, dass die emittier-ten Strahlen in unterschiedlichen Winkeln auf die FluKo-Oberfläche fallen. Acrylglas ist optisch dichter als die umgebende Luft und reflektiert daher wie eine Wasserober-fläche ab einem bestimmten, material-abhängigen Winkel die einfallende Strah-lung. Dadurch leitet der FluKo Licht zu seinen Seitenflächen. Wenn nun unter dem FluKo Solarzellen liegen, erreichen Photonen durch die Lichtleitung diese Solarzellen, auch wenn die Photonen ursprünglich gar nicht direkt über der



Konventionelle mit Siebdruck her-gestellte Kontaktgitter haben Finger-breiten von ca. 110 μm , d.h. 0,01 cm. Ausgehend von dieser Fingerbreite bei einer Zelle mit 70 Kontaktfingern und einem Wirkungsgrad von 17,4 Prozent, lässt sich der Wirkungsgrad allein durch Verwendung von mehr (aber schmaleren) Fingern bis auf 17,6 Pro-zent steigern. In Kombination mit dem Laserdotieren aus (03) und dem Rückseitenkontakt von (04) kommen so Wirkungsgradverbesserungen von etwa zwei Prozent (absolut) selbst bei industriellen Solarzellen zustande.

Kontaktgitter beruht deshalb auf einem Kompromiss zwischen elektrischen und optischen Verlusten. Auch hier hat das *ipe* eine neue, bisher übersehene Optimie-rungsmöglichkeit gefunden.

(05) zeigt in einem Höhenlinienbild, wie der Wirkungsgrad der Solarzellen von der Breite und Anzahl der Finger abhängt. Konventionelle Zellen haben mit etwa 60 im Siebdruck aufgetragenen Fingern von etwa 120 μm Breite und einer Höhe von 25 μm einen (guten) Wirkungsgrad um 17 Prozent. (05) demonstriert, dass 90 Fin-ger mit einer Breite von 70 μm und einer Höhe 20 μm Wirkungsgrade von über 17,6 Prozent zuließe; der derzeitige Stand der Siebdruck-Technik lässt die Produk-tion solcher Frontkontakte aber noch nicht zu. Mit der Siebdruck-Technik und mit Fingerbreiten von 110 μm können wir aber immerhin schon aus einer 17,2 Pro-zent-Solarzelle allein schon durch ein ver-

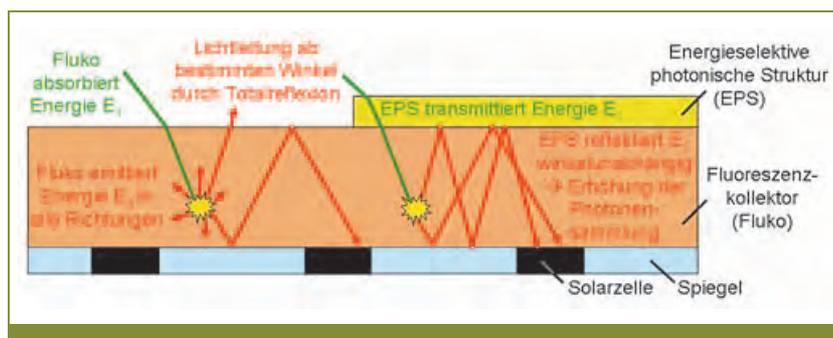
Solarzelle auf den FluKo traf. Durch die Lichteinsammlung mit Hilfe des Flukos besteht die Möglichkeit, Solarzellen zu verkleinern und mit einem Abstand zueinander unter dem Kollektor zu verteilen. Auf diese Weise spart man Solarzellenfläche ein, denn die gesamte Solarzellenfläche ist kleiner als die beleuchtete FluKo-Fläche. Die im FluKo stattfindende Streuung konzentriert die einfallende Sonnenstrahlung, so dass sie auf den Zellen landet und zur Stromerzeugung beiträgt.

Wie im linken Teil von (06) zu sehen, verliert der konventionelle Kollektor leider den Teil der emittierten Strahlen, der unter einem kleineren Winkel als dem der Totalreflexion auf die FluKo-Oberfläche trifft. Den Ausweg bietet hier eine energie-selektive photonische Struktur (EPS). Sie transmittiert Strahlung, die der FluKo absorbiert, reflektiert jedoch alle Strahlung, die der FluKo emittiert. Diese Reflexion erfolgt unabhängig von der Einstrahlrichtung der Photonen. So verbleiben auch Strahlen im FluKo, die die Totalreflexion nicht im Kollektor hält. Die EPS erhöht in diesem System also die Photonensammlung und damit die Stromerzeugung.

Fluoreszenzkollektoren haben gegenüber geometrisch konzentrierenden Systemen den großen Vorteil, dass sie Sonnenstrahlung unabhängig von der Einstrahlrichtung absorbieren. Sie müssen der Sonne also nicht nachgeführt werden und konzentrieren direktes ebenso wie diffuses Licht. Die zurzeit verwendeten EPS entsprechen einem dielektrischen Spiegel. Das bedeutet, dass durch eine definierte Abfolge Multi-Schichten verschiedener Materialien mit Dicken im Nanometerbereich aufeinander aufgebracht werden. Der Aufbau der Schichtstruktur hat eine Variation des Brechungsindex zur Folge, die die Transmission und Reflexion der EPS bestimmt und sie dem Emissionsverhalten des FluKos anpasst.

Die als EPS verwendeten dielektrischen Spiegel weisen allerdings die Brechungsindexvariation nur in einer Richtung auf. Auf diese Richtung, also auf senkrechten Einfall der Sonneneinstrahlung sind dann Transmission und Reflexion angepasst, während für alle anderen Richtungen die transmittierten und reflektierten Energiebereiche vom Optimum abweichen. Damit braucht ein photovoltaisches System mit Fluoreszenzkollektor und dielektrischem Spiegel als EPS zur optimalen Photonen-

einsammlung eine teure Nachführung. Außerdem reflektiert die EPS nicht alle von innen auf die FluKo-Oberfläche fallenden Strahlen im optimalen Bereich und damit verschlechtert sich die Lichtleitung im FluKo.

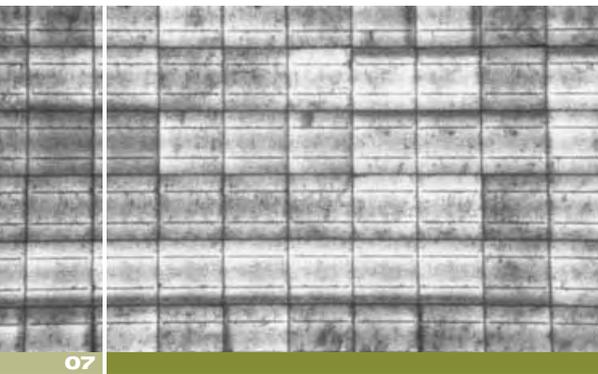


Deswegen arbeitet die Forschung an so genannten dreidimensionalen photonischen Kristallen. Die Konzepte zur Herstellung basieren auf der Brechungsindexvariation in allen drei Raumrichtungen. Das ist z. B. durch die Schichtung von Kugeln in Nanometergröße möglich. So kommen auch Opale zu ihrem vielfarbigem Schimmern. Eine andere Lösung besteht im kreuzweisen Stapeln von nanometerdünnen Stäben, wodurch quaderförmige Zwischenräume entstehen, die in allen drei Raumrichtungen den Brechungsindex gleichermaßen variieren. Auf ganz ähnliche Weise kommt der Pfauenschwanz zu seinen schimmernden Augen.

5. Solarmodule zum Leuchten bringen

(07) zeigt ein sogenanntes „Lumineszenzbild“ eines Solarmoduls. Jede der Zellen im Modul hat eine Kantenlänge von circa 16 Zentimetern. Am schnellsten kann man heute ein Solarzelle oder sogar ein solches Photovoltaik-Modul charakterisieren, indem man eine externe Spannung anlegt und so das Modul wie eine Leuchtdiode zum Leuchten bringt, man spricht von „Elektrolumineszenz“. Die Strahlung aus der Solarzelle misst man einfach mit einer im infraroten Bereich hochempfindlichen Digitalkamera. Der Vorteil dieser Methode liegt zum Einen in ihrer hohen Ortsauflösung bei gleichzeitig sehr geringen Messzeiten im Minuten- bis Sekundenbereich und zum Anderem im hohen Informationsgehalt der Elektrolumineszenzbilder.

Fluoreszenzkollektoren erlauben es, teure Solarzellenfläche einzusparen und das Licht dennoch auf die Solarzellen zu lenken. Der Kollektor absorbiert Strahlung bei einer Energie E_1 und emittiert sie bei einer niedrigeren Energie E_2 . Zwischen den Solarzellen auf der Rückseite sind Spiegel angebracht. Die photonische Struktur auf der Vorderseite lässt die einfallende Strahlung mit der Energie E_1 durch, aber reflektiert die Strahlung der Energie E_2 . Auf diese Weise ist das Licht in der Anordnung regelrecht „eingesperrt“, bis es schließlich in einer der Solarzellen absorbiert wird.



Elektrolumineszenzaufnahme eines Solarmoduls. Jede einzelne Zelle ist $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$ groß; sie enthält jeweils zwei breite (horizontale) Streifen, die die Kontaktfinger (siehe **(01)**) miteinander verbinden. An diesen Stellen kann keine Strahlung aus den Zellen herauskommen, deshalb erscheinen die Streifen dunkel. Helle Stellen bedeuten eine gute Qualität der Solarzellen. Die anderen dunklen Stellen in den Zellen entstehen folglich durch elektronische Defekte. Solche Bilder enthalten daher Informationen über die elektrische und optische Qualität der Zellen.

Die Leistungsfähigkeit einer Solarzelle ist direkt proportional zu ihrer Leistungsfähigkeit als LED (light emitting diode, Leuchtdiode). Eine Solarzelle, die als LED betrieben viel Strahlung abgibt, produziert unter Bestrahlung mit geeignetem Spektrum eine hohe elektrische Leistung. Die Solarzelle wird bei der Elektrolumineszenzmessung als LED betrie-

ben, das heißt, die Solarzelle ist in Durchlassrichtung geschaltet. Auf Grund strahlender Rekombination der injizierten Überschussladungsträger emittiert die Solarzelle Strahlung im infraroten Spektralbereich, für den das Auge unempfindlich ist. Deshalb wird diese Strahlung mit einer im Infraroten empfindlichen, Peltier-gekühlten Silicium CCD-Kamera „abfotografiert“. Durch Auslesen der Kameradaten (Intensität der Strahlung pro Kamera-Pixel) entsteht so ein orts aufgelöstes Bild der Elektrolumineszenz der Solarzelle. Faktoren, die die strahlende Rekombination und damit die photovoltaische Leistungsfähigkeit der Zelle bestimmen, sind z. B. Oberflächendefekte, Kurzschlüsse und Kristallfehler in der Zelle. Stellen mit solchen Defekten erscheinen im Elektrolumineszenzbild dunkler.

Die Intensität der Elektrolumineszenz an einem bestimmten Punkt hängt neben der Materialqualität von der lokalen Spannung ab, die in diesem Punkt der Zelle anliegt. Deswegen enthält ein Elektrolumineszenzbild immer auch die Information über die Spannungsverluste, die über Zuleitungswiderstände verloren gehen, da bei der Elektrolumineszenzmessung die Ladungsträger auf dem selben elektrischen Weg in die Solarzelle eingebracht, wie sie im Solarzellenbetrieb auch im Modul auf dem Dach vom Verbraucher abgezogen werden. Ursachen für hohe Zuleitungswiderstände sind z. B. ein schlechtes Design der Frontgitter, Fingerunterbrechungen oder im Modul schlecht verschaltete Solarzellen.

(07) mit den unterschiedlich grauen, quadratischen Solarzellen zeigt eine Elektrolumineszenzaufnahme eines multikristallinen Silizium Solarmoduls der Firma SolarWorld bei einem angelegten Strom von 7,5 A. Der Schwarz/Weiß-Kontrast stellt die Intensität der Strahlung dar, wo-

bei Weiß eine hohe Strahlungsintensität bedeutet. Je heller eine Zelle leuchtet, desto besser kann die durch den eingepprägten Strom induzierte Strahlung die Zelle verlassen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass an diesen Stellen die von der Sonne generierten Ladungsträger gut (ohne vorher zu rekombinieren) zu den Kontakten gelangen können. Der Wirkungsgrad der Solarzelle ist dort also besonders hoch. Die Ursachen für dunkle Stellen sind entweder eine schlechte Qualität des Solarzellenmaterials selber oder aber die anliegende Spannung ist durch den Spannungsabfall über einen hohen Zuleitungswiderstand verringert. Gegenstand aktueller Forschung am *ipe* ist es, zwischen diesen beiden Möglichkeiten zu unterscheiden und die dadurch entstehenden Verluste quantitativ zu ermitteln.

6. Welche Technologie bringt am meisten?

(08) zeigt Photovoltaikanlagen, die das *ipe* seit dem Jahr 2006 an drei unterschiedlichen Standorten betreibt: Stuttgart (Deutschland), Nikosia (Zypern) und Kairo (Ägypten). Hierbei geht es darum, den Ertrag der jeweils dreizehn verschiedenen Photovoltaikanlagen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu erforschen.

Die untersuchten Technologien basieren auf mono- und multikristallinen Solarzellen aus Silizium (c-Si), aber auch auf Dünnschichttechnologien aus amorphem Silizium (a-Si), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) und Cadmium-Tellurid (CdTe). Ziel ist die Ermittlung der optimalen Photovoltaik-Technologie für einen Standort und deren Verhalten physikalisch zu erklären. Die Homepage www.ipe.uni-stuttgart.de/pvsystem zeigt die aktuellen Messwerte aller untersuchten Photovoltaikanlagen.

Alle aufgebauten Photovoltaik-Anlagen haben jeweils eine ungefähre Leistung von einem Kilowatt (kW) und sind für den jeweiligen Standort im optimalen Winkel zur Sonne ausgerichtet. Ein bei allen Anlagen identischer Wechselrichter speist die erzeugte Solarenergie in das öffentliche Stromnetz ein. Das dreigeteilte Bild zeigt die Solaranlagen an den drei Standorten. In Nikosia arbeitet das *ipe* mit der *Photovoltaic Technology Group* des *Department of Electrical and Computer Engineering (ECE)* der

ZUSAMMENFASSUNG

Die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, die Photovoltaik, bietet das größte Potential zur Bereitstellung elektrischer Energie aus Erneuerbaren Energien. Heute erhältliche Photovoltaikmodule mit Solarzellen aus kristallinem Silizium erreichen Wirkungsgrade um 15 Prozent, kleine Hochleistungszellen im Labor bis circa 25 Prozent. Um Photovoltaik-Strom in wenigen Jahren unter 20 cent/kWh anbieten zu können, müssen die Wirkungsgrade weiter steigen; dazu werden kostengünstige, schnelle Herstellungstechnologien mit niedrigem Energieaufwand und noch dünnere Siliziumwafer eingesetzt. Hierfür entwickelt das Institut für Physikalische Elektronik (ipe) Technologien und Konzepte fortgeschrittener industrieller Solarzellen. Verbesserungen und Einsparungen ergeben sich dabei aus der Integration von Verfahren der Dünnschicht- und Lasertechnologie mit der heute aktuellen Siebdrucktechnik.

University of Cyprus zusammen. In Kairo erfolgt die Zusammenarbeit mit der German University in Cairo (GUC), für welche die Universitäten Stuttgart und Ulm Paten-hochschulen sind.

In einem durchschnittlichen Sonnenjahr erzeugen die Solaranlagen in Stuttgart etwa 1000 kWh elektrische Energie pro Jahr und installiertem Kilowatt. Dieser Wert entspricht ungefähr dem jährlichen Stromverbrauch einer Person, wobei die c-Si Technologien ca. 7 bis 9 m² Dachfläche für eine Leistung von 1 kW benötigen. Die Dünnschichtanlagen benötigen für die gleiche elektrische Leistung aufgrund ihres geringeren Wirkungsgrades 9 bis 18 m² Dachfläche, erzielen aber dann auf der größeren Fläche auch wieder etwa 1000 kWh pro Jahr. Bezüglich des Energieertrages (kWh/kW) ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Photovoltaik-Technologien also nicht sehr groß!

Obwohl die höheren Temperaturen in Zypern den Wirkungsgrad der Solarmodule etwas senken, sind die Energieerträge aufgrund der deutlich längeren Sonnenstunden um circa 64 Prozent höher als in Stuttgart. Zwischen den verschiedenen Technologien ergeben sich maximale Unterschiede von 15 Prozent im jährlichen Energieertrag, welche aber zu einem großen Teil durch die Toleranzen bei der Nennleistungsbestimmung (nach dem Typenschild) verursacht sind.

Die Untersuchungen in Ägypten ergaben, dass der Sandstaub die Leistung der Solaranlagen um bis zu 35 Prozent innerhalb eines Jahres beeinträchtigt. Das Thema Reinigung spielt nahe der Wüste eine große Rolle, wohingegen in Stuttgart der Regen die Module ausreichend reinigt.

Neben den feststehenden PV-Anlagen untersucht das ipe auch den Energiegewinn durch eine zweiachsige Sonnennachführung (Tracker) an den verschiedenen Standorten. Hier ergeben sich Energie-

gewinne von rund 30 Prozent gegenüber feststehenden Modulen.

Für private oder kommerzielle Betreiber von Solaranlagen sind natürlich die Energieerträge in Bezug zur (nach dem Typenschild!) bezahlten Nennleistung nach den relativ groben Typenschildangaben ausschlaggebend.

Im Fokus der wissenschaftlichen Untersuchungen steht deshalb die exaktere Bestimmung der tatsächlichen Nennleistung, sowie das Temperatur- und Schwachlichtverhalten der Solarmodule. Ziel ist es, aus diesen Werten per Simulation den Jahresenergieertrag im Voraus zu bestimmen und somit die optimale Photovoltaik Technologie für einen bestimmten Ort auswählen zu können.

Christian Ehling,
Anke Helbig, Jürgen Köhler, Liv Prönneke,
Markus Schubert, Jürgen H. Werner,
Renate Zapf-Gottwick,
Heinz-Georg Zäpfle-Tann, Bastian Zinßer



Jeweils dreizehn verschiedene Photovoltaikanlagen in Stuttgart (oben), Nikosia (Mitte) und Kairo (unten) dienen dazu, den Jahresenergieertrag der unterschiedlichen Technologien für Solarmodule (kristallines Silizium, amorphes Silizium, Cu(In,Ga)Se₂ und CdTe) unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu erforschen. Je nach Material findet man Unterschiede in der Abhängigkeit der Wirkungsgrade von Temperatur und Beleuchtungsstärke.

DIE AUTOREN

DIPL.-ING. CHRISTIAN EHLING

studierte bis Ende 2006 an der Universität Stuttgart Elektrotechnik und Informationstechnik. Seine Diplomarbeit über „Charakterisierung von laser-induzierten Defekten in kristallinem Silizium“ absolvierte er am Institut für Physikalische Elektronik (ipe). Seitdem promoviert er zum Thema „Heterorückkontakte für industrielle Silizium-solarzellen“.

**DIPL.-NAT. ANKE HELBIG**

beendete Anfang 2006 ihr Studium Angewandte Naturwissenschaft an der TU Bergakademie Freiberg mit ihrer Diplomarbeit zur „Prozessinduzierten Defektanalyse von Solarzellen mittels Mikrowellen-detektierter Photoleitfähigkeit.“ Seit 2007 promoviert sie am ipe zum Thema „Quantitative Auswertung von Elektrolumineszenzbildern“.

**DR.-ING. JÜRGEN KÖHLER**

studierte Physik an den Universitäten Tübingen und Stuttgart. Seit 1984 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am ipe; er promovierte im Jahr 1996 zu „Vorionisation von Excimer-Lasergasen mit Hilfe der stillen Entladung“. Seit 1997 leitet er die Gruppe „Laserprozesse“ am ipe.

**DIPL.-PHYS. LIV PRÖNNEKE**

studierte Physikalische Technologien an der TU Clausthal, wo sie im Frühjahr 2006 mit einer Diplomarbeit zum Thema „Implementierung eines Laserschreibaufbaus zur Herstellung von Wellenleiterstrukturen“ abschloss. Seit Juni 2006 promoviert sie am ipe zum Thema „Lumineszenzkollektoren für Solarzellen aus Silizium“.

**DR.-ING. MARKUS SCHUBERT**

studierte Elektrotechnik an der Universität Stuttgart und promovierte im Jahr 1992 am ipe zum Thema „Ramanstreuung an amorphem Silizium und verwandten Halbleitern“. Er leitet seit 1996 die Gruppe „Sensorik“ am ipe und ist gleichzeitig stellvertretender Leiter des ipe.

**PROF. DR. DR. HABIL. JÜRGEN H. WERNER**

studierte Physik an der Universität Tübingen, promovierte 1983 zum Thema „Korngrenzen in Silizium“ am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart, verbrachte zwei Jahre in den USA, habilitierte sich im Jahr 1992 an der TU München zum Thema „Halbleitergrenzflächen“ und leitet seit 1996 das ipe.

**DR. RENATE ZAPF-GOTTWICK**

studierte Physik an der TH Darmstadt Physik und promovierte dort zum Thema „Herstellung und Charakterisierung von Kohlenstoff-Mikrostrukturen“. Nach einer Kinderpause arbeitete sie am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung an InGaAs-Nanotubes und GaAs-Quantenpunkten. Seit 2007 leitet sie die Gruppe „Siebdruck“ am ipe.

**DIPL.-CHEM. HEINZ-GEORG ZÄPFLE-TANN**

studierte Chemie und Elektrotechnik an der FH Weihenstephan und der TU München, wo er im Jahr 2008 zum Thema „Wasserbasierte C₂H₅OH-Dotierung von Klärschlamm-Dunkelzellen“ diplomierte. Seit Mitte 2009 promoviert er am ipe zum Thema „Optimierter Verbrauch von fluiden Rothschild-Phasen in der Programm-Qualität von Solar-Modellen“.

DIPL.-ING. BASTIAN ZINSSER

studierte an der Universität Stuttgart Elektro- und Informationstechnik. Seine Diplomarbeit über „Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen“ schloss er 2005 am ipe ab. Seitdem promoviert er am ipe zum Thema „Jahresenergieerträge unterschiedlicher Photovoltaik-Technologien bei verschiedenen klimatischen Bedingungen.“

**Kontakt**

Institut für Physikalische Elektronik
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-67141
Fax 0711/685-67143
E-Mail: sekretariat@ipe.uni-stuttgart.de
Internet: <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/>