

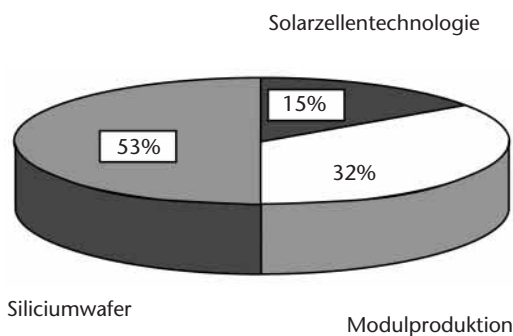
Neue Konzepte für Siliciumsolarzellen

Solarzellen aus Siliciumwafern (Czochralski- und multikristallines Silicium) stellen immer noch den mit Abstand größten Anteil (1998: 84%) des Photovoltaikmarktes. Der entscheidende Kostenfaktor bei Modulen aus Siliciumsolarzellen ist der Preis des Siliciumwafers selbst (siehe Abb. 1).

Um diesen Kostenfaktor zu senken, können mehrere Strategien verfolgt werden:

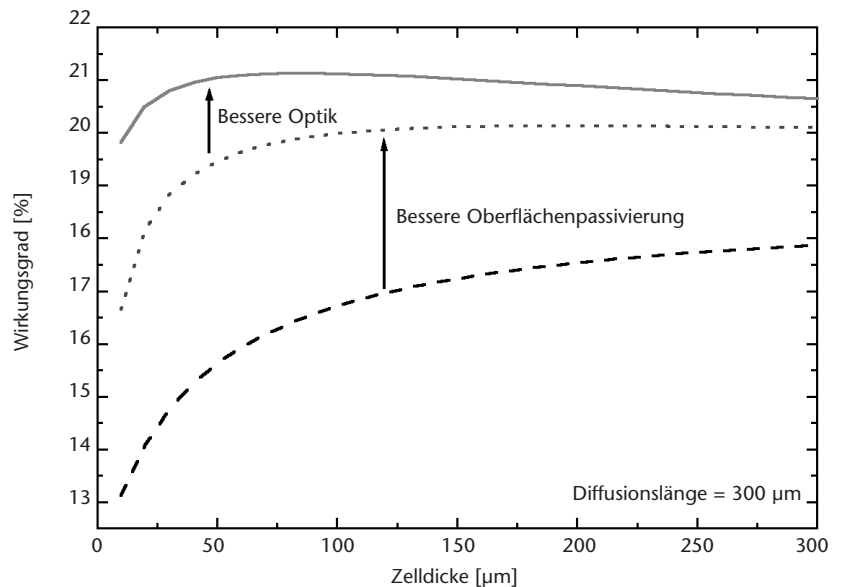
- Durch die Verwendung von abgeschiedenen Siliciumschichten (Dünnschichtsolarzelle) können die Materialkosten gesenkt werden. Allerdings bleiben die hierbei erzielten Wirkungsgrade bisher deutlich hinter denen von Solarzellen aus Siliciumwafern zurück.
- Durch die Reduzierung der Waferdicke können die Kosten pro Wafer reduziert werden.
- Durch Erhöhung des Wirkungsgrades kann der einzelne Siliciumwafer besser genutzt werden. Damit sinkt der Energiegestehungspreis.

Die beiden letztgenannten Ansätze sollen Thema dieses Vortrages sein. Sie sind sehr eng miteinander verknüpft, da Solarzellen mit reduzierter Dicke eine höherwertige Zellentechnologie erfordern, die gleichzeitig auch Vorbedingung für die Erzielung höherer Wirkungsgrade ist. Abb. 2 zeigt die Auswirkungen verschiedener Verbesserungen der Solarzellenstruktur auf



den Wirkungsgrad bei verschiedenen Zelldicken. Ausgehend von einer relativ einfachen Zellenstruktur (gestrichelte Linie) wurde zuerst die Oberflächenpassivierung stark verbessert (gepunktete Linie). Durch die Oberflächenpassivierung wird verhindert, daß die durch das Sonnenlicht erzeugten Ladungsträger an den Oberflächen der Siliciumwafer durch Rekombination "vernichtet" werden.

Dipl.-Phys.
Stefan Glunz
Fraunhofer ISE
stefan.glunz@ise.fhg.de



Es ist anschaulich klar, daß bei einer reduzierten Waferdicke der Oberflächenpassivierung eine immer wichtigere Rolle zukommt. Wenn zusätzlich der interne Lichteinfang durch eine verbesserte interne Reflexion und eine intelligenter Lichtführung erhöht wird, so erhöht sich das Wirkungsgradpotential nochmals (durchgezogene Kurve). Die Materialqualität und die externe Reflexion wurden bei allen Rechnungen identisch gewählt. Es ist deutlich zu erkennen, daß einerseits das Wirkungsgradpotential generell durch die Verbesserung der Zellstruktur erhöht wird und andererseits dieses Wirkungsgradniveau auch bei kleinen Zelldicken beibehalten werden kann.

Abbildung 2 ↑
Einfluß der Oberflächenpassivierung und des internen Lichteinfangs auf den Wirkungsgrad bei verschiedenen Zelldicken.

Abbildung 1 ←
Anteile an den Kosten eines Photovoltaikmoduls aus Siliciumsolarzellen

Schon seit geraumer Zeit stehen Solarzellenkonzepte zur Verfügung mit denen Wirkungsgrade weit über 20 % erreicht werden können (siehe zum Beispiel Abb. 3). Allerdings sind diese bisher nicht in die industrielle Fertigung übernommen worden, da ihre Herstellung zu aufwendig und damit zu teuer ist. In letzter Zeit sind aber verstärkt Bemühungen unternommen worden, diese Konzepte vereinfacht umzusetzen.

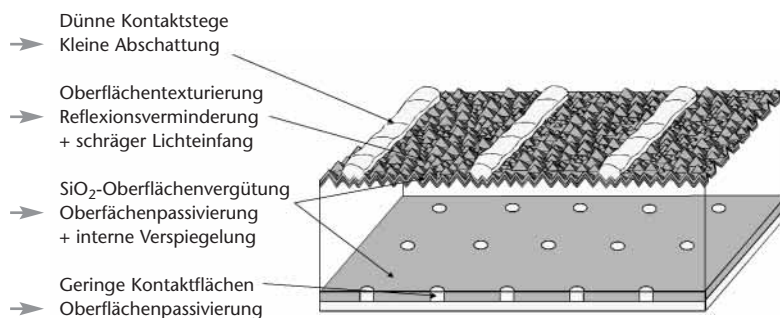
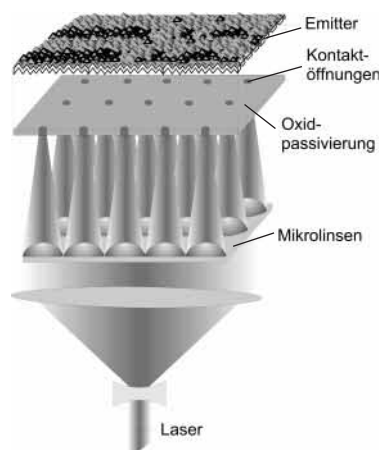


Abbildung 3
Hocheffiziente Solarzelle (Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Konzept)

Wichtigstes Merkmal hocheffizienter Siliciumsolarzellen ist die sehr gute Oberflächenpassivierung. Eine optimale Oberflächenpassivierung kann durch die Beschichtung mit Siliciumdioxid oder Siliciumnitrid erreicht werden. Allerdings muß beim Aufbringen der Kontakte diese Isolatorschicht teilweise wieder geöffnet werden (siehe Abb. 3). Dieser Prozeßschritt wurde bisher durch relativ aufwendige Photolithographieschritte bewerkstelligt. Am Fraunhofer ISE ist es nun gelungen, das Öffnen der Isolatorschicht mittels Laserablation durchzuführen (LA-PERC-Struktur, siehe Abb. 4).

Abbildung 4
Öffnen der Rückseitenpunkte einer PERC-Struktur (Passivated Emitter and Rear Cell) mittels Laserablation. Durch den Einsatz von Mikrolinsenarrays kann der Durchsatz gegenüber der bisher verwendeten Einzelablation nochmals deutlich gesteigert werden.



Die Anzahl der Prozeßschritte zur Herstellung der Rückseitenpunktkontakte konnte so um einen Faktor 5 reduziert werden. Mit dieser eleganten Methode konnten am ISE bereits Wirkungsgrade über 20% erzielt werden.

Auch bei der Aufbringung der Vorderseitenkontakte wurde bisher bei hocheffizienten Solarzellen mit Photolithographie gearbeitet. Am ISFH (Institut für Solarenergieforschung, Hameln) ist es gelungen, durch eine geschickte Oberflächentexturierung (mittels Sägen) und dem nachfolgenden Schrägaufdampfen der Vorderseitenmetallkontakte diesen Photolithographieschritt zu vermeiden. Abb. 5 zeigt eine Prinzipskizze der sogenannten OECO-Struktur (Obliquely Evaporated Contacts). Auch mit diesem Zellkonzept konnten bereits Wirkungsgrade über 20% erreicht werden.

Mit der mechanischen Oberflächenstrukturierung können auch andere interessante Strukturen erzeugt werden. Prominentes Beispiel hierfür ist die sogenannte POWER (Polycrystalline Wafer Engineering Result) Solarzelle der Universität Konstanz. Durch das Sägen von V-förmigen Gräben auf der Vorder- und Rückseite, wobei die Vorder- zu den Rückseitengräben senkrecht stehen, kann der Wafer teilweise durchbrochen werden. Dadurch wird eine Semitransparenz erreicht. Dieser Effekt, der naturgemäß bei Solarzellen auf den ersten Blick einmal "unerwünscht" ist, erlaubt es, insbesondere bei der Integration in Gebäuden (siehe Abb. 6), interessante ästhetische Effekte zu erzielen.

Um die Verschaltung der einzelnen Zellen zu einem Modul stark zu vereinfachen, wäre es günstiger, wenn sich die p- und n-Kontakte nicht auf der Vorder- und Rückseite, sondern nur auf einer Seite der Solarzelle befinden würden. Dies ist bei der sogenannten Rückseitenkontaktsolarzelle realisiert. Ein weiterer Vorteil dieser Struktur ist, daß keine Abschattung durch die Metallkontakte auftritt, weil die Kontaktfinger auf der Rückseite der Zelle angeordnet sind.

Da sich allerdings der sammelnde pn-Übergang auf der lichtabgewandten Seite der Zelle befindet, müssen praktisch alle durch das Licht

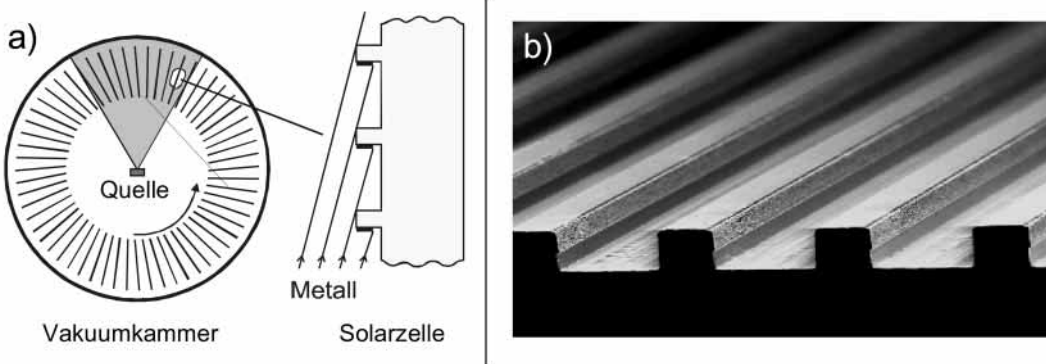
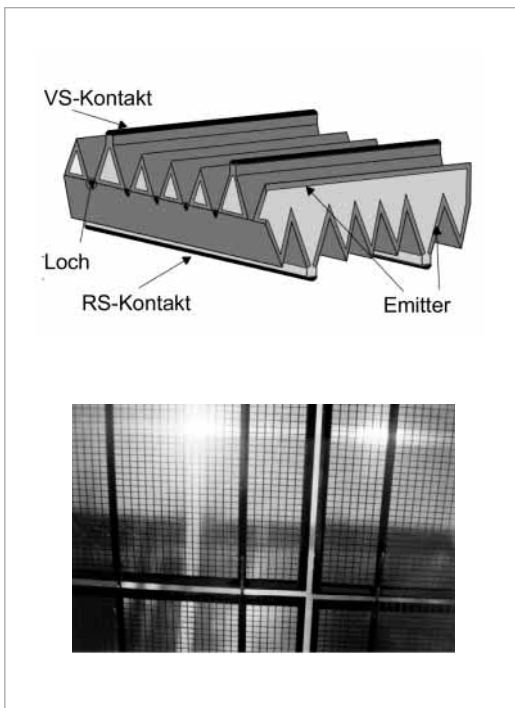


Abbildung 5
OEKO-Struktur (a) Prinzipskizze und b) Rasterelektronenmikroskopaufnahme): Durch die Strukturierung der Solarzellenoberfläche ist es möglich, die Vorderseitenkontakte durch schräges Aufdampfen ohne weitere Maskierungsschritte zu erzeugen (Mit freundlicher Genehmigung von A. Metz, ISFH).



generierten Ladungsträger durch die gesamte Zelle diffundieren. Bei gutem Ausgangsmaterial (sprich hoher Diffusionslänge) spielt dies keine große Rolle und am Fraunhofer ISE konnten schon Wirkungsgrade über 22% mit diesem Solarzellenkonzept erzielt werden. Da die Rückseite dieses Zelltyps nicht vollständig mit Kontaktflächen bedeckt ist, eignet sie sich auch sehr gut als beidseitig beleuchtbare (bifaziale) Solarzelle. So konnte am Fraunhofer ISE weltweit die erste Zelle hergestellt werden, die jeweils einen Wirkungsgrad über 20% von beiden Seiten aufweist.

Abbildung 6
Semitransparente POWER Solarzellen (Prinzipskizze und Foto, mit freundlicher Genehmigung von P. Fath, Uni Konstanz).

Kommt allerdings Material mit geringer Diffusionslänge zum Einsatz so muß das Rückseitenkontaktkonzept modifiziert werden. Dabei werden Emitter auf beiden Seiten des Wafers diffundiert und diese mittels Löcher durch den Wafer miteinander verbunden (siehe Abb. 7).

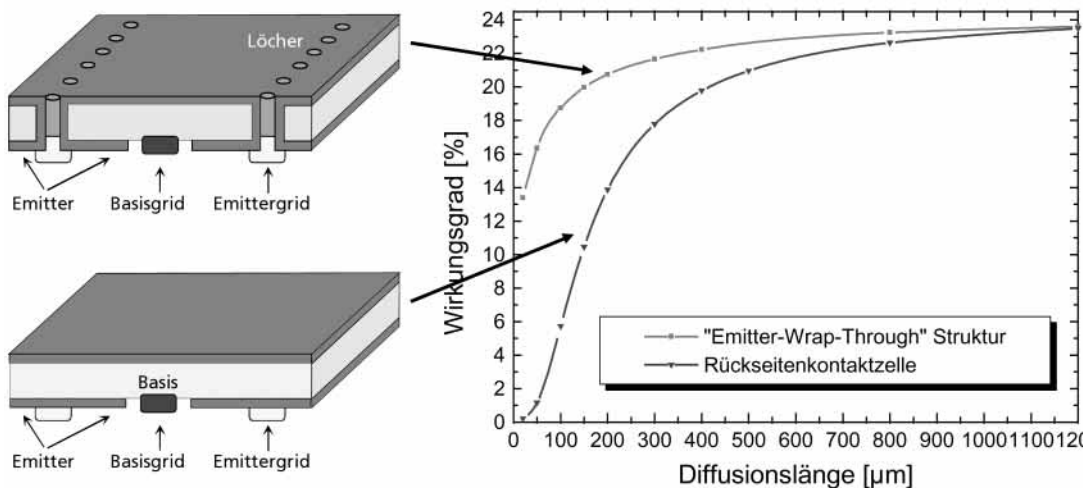


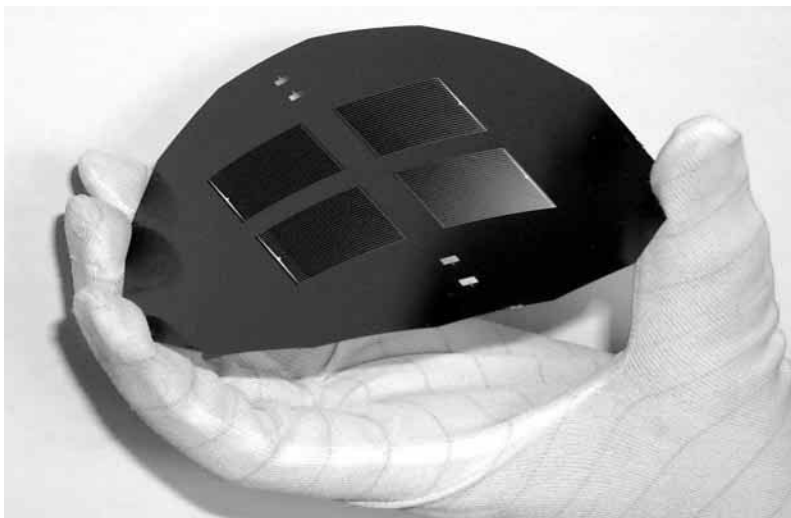
Abbildung 7
Vergleich des Einflusses der Diffusionslänge auf den Wirkungsgrad einer "Emitter-Wrap-Through"-Zelle (oben) und einer Rückseitenkontaktzelle (unten).

Dadurch können die am lichtzugewandten pn-Übergang gesammelten Ladungsträger über die Löcher zur Rückseite der Zelle und damit zu den Kontakten geleitet werden. *Abb. 7* zeigt deutlich, daß mit dieser sogenannten EWT (Emitter-Wrap-Through)-Struktur der Wirkungsgrad auch bei kleinen Diffusionslängen recht hoch bleibt, während er beim "reinen" Rückseitenkontaktzellenkonzept drastisch absinkt.

Am Fraunhofer ISE konnte eine EWT-Zelle mit einem Wirkungsgrad von 21.4% hergestellt werden, was das große Potential dieser Struktur nochmals betont.

Wie schon eingangs erwähnt kann eine Reduzierung der Waferdicke zur Kostenreduzierung beitragen, wenn die Zellstruktur auf die gewählte Waferdicke angepaßt ist. *Abb. 8* zeigt eine 85 µm "dünne" hocheffiziente Solarzelle auf Czochralski-Silicium.

Abbildung 8
85 µm "dünne"
Solarzelle auf
Czochralski-Silicium



Außer der Materialersparnis wird allerdings auf diesem Bild noch eine andere herausragende Eigenschaft dieser Zellen ersichtlich: Sie sind flexibel. Damit bieten sich völlig neue Anwendungsgebiete.

Die Liste neuer Zellkonzepte für Solarzellen aus Wafersilicium ließe sich noch weiter fortsetzen. Es steckt also immer noch viel Potential in dieser Technologie, die schon seit langer Zeit den Photovoltaikmarkt beherrscht - ein echter "Evergreen" sozusagen!