

Schlussbericht für das Forschungsvorhaben

Schneller IR-Messplatz zur Charakterisierung von Solarzellen und Material / Dünne Silizium- Wafer durch optimiertes Drahtsägen IR-Messplatz/DWS FKZ 0329969

Ausführendes Institut:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
Projektleitung:	Dr. W. Warta, Dr. D. Kray
Bearbeiter:	W. Warta, M. Schubert, M. Kasemann, J. Isenberg, S. Pingel D. Kray, M. Schumann, F. Haas, A. Eyer
Redaktion:	Dr. W. Warta, Dr. D. Kray
Projektdauer:	01.09.2004 bis 31.5.2005

November 2005

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0329969 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Ziele des Vorhabens.....	4
2	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	7
3	Arbeitsergebnisse aus Teil A	8
3.1	Aufbau, Spezifikationen und Messungen der Ladungsträgerdichte mit dem neuen Kamerasystem	8
3.2	Detaillierte Tests zur Validierung der Eigenschaften des neuen Systems	10
3.2.1	Kamerarauschen	10
3.2.2	Linearität, Dynamik	10
3.2.3	Überstrahlung	12
3.2.4	Übersteuerungsempfindlichkeit	13
3.2.5	Signalkonstanz	14
4	Arbeitsergebnisse aus Teil B	15
4.1	Aufbau des Drahtsäge-Labors.....	15
4.2	Versuche zum Einfluss der Maschinenbeladung	19
4.3	Vergleich der Schnittprozesse mit losem und gebundenem Korn.....	20
5	Kosten- und Marktanalyse.....	23
5.1	Marktübersicht	23
6	Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	23

1 Motivation und Ziele des Vorhabens

Dieses Vorhaben unterteilt sich in 2 Teile:

Teil A: Schneller IR-Messplatz

Teil B: Optimierte Drahtsägen von dünnen Silicium-Wafern

Teil A:

Die Verfügbarkeit schneller Diagnostikmöglichkeiten in der Solarzellenproduktion wird für Herstellungsbetriebe mit hoher Produktionskapazität zunehmend wichtig für die Qualitätskontrolle. Ziel des Teils A des Vorhabens war es, den derzeitigen hohen Entwicklungsstand des Fraunhofer ISE auf dem Gebiet der IR-Messtechnik für die Solarzellenentwicklung in einen schnelleren und zur Messung großer Industriewafer und -Zellen geeigneten Messplatz umzusetzen, der als Basis für die Weiterentwicklung dieser Techniken zur Reife für den Industrieinsatz geeignet ist. Gleichzeitig wird die Verfügbarkeit der Messverfahren für den Einsatz in allen Solarzellen-Entwicklungsprojekten gesichert.

Neben dem Lasersystem zur flächigen Erzeugung der freien Ladungen ist das Herzstück der Messapparatur das Infrarotkameranystem, mit dem durch Einsatz von Lock-In-Technik die erforderliche sehr hohe Empfindlichkeit erreicht wird. Ein solches System wurde bereits vorher am Fraunhofer ISE entwickelt und eingesetzt. Weitere laufende Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, das Verfahren wesentlich schneller durchführen und dadurch attraktiver für den industriellen Einsatz machen zu können. Das bisherige System beruhte auf einer Kamera der Fa. Thermosensorik. Ein alternatives System war aus drei Gründen erforderlich: 1) Die vorhandene Kamera entsprach nicht mehr dem Stand der Technik im Hinblick auf die für schnelle Aufnahmen notwendigen hohen Bildraten. 2) Da wir für das bestehende System keinen Zugang zur Ansteuerungssoftware erhalten konnten, wären Entwicklungsarbeiten aufgrund der unzureichenden Reaktionszeit des Herstellers nur sehr mühsam und langwierig möglich gewesen. 3) Der vielfältige Einsatz des bestehenden Systems führte zu erheblichen Engpässen, die spezifizierte Lebensdauer der bisherigen Kamera wird in absehbarer Zeit erreicht. Mit dem neuen System steht nun eine hervorragende Basis für die folgenden Entwicklungsarbeiten zur Verfügung.

Teil B:

Ziel dieses Teils des Vorhabens war die Installation eines Drahtsägelabors, mit dem industrienaher Forschung zur Optimierung des Drahtsägeprozesses möglich ist. Der Hintergrund ist die Tatsache, dass der reine Silicium-Wafer mit etwa 50% den

größten Anteil an den Gesamtmodulkosten bei der marktbeherrschenden Silicium-Wafer-Solarzellen-Technologie stellt. Dabei liegen die Kosten für den Prozess des Drahtsägens bei etwa 25% der Gesamtkosten. Damit bietet sich die Optimierung des Drahtsägens für eine effiziente Kostenreduktion photovoltaischer Stromerzeugung an.

Der Prozess des Drahtsägens ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein glatter Stahldraht von vielen Kilometern Länge wird von einer Spule über ein Drahtspannsystem auf ein Paar berillter Rollen geführt, sodass ein Drahtfeld mit vielen parallelen Drahtelementen entsteht. Am Ende der Rollen wird der Draht dann auf eine Aufnahmespule geführt. Mit Hilfe dieses Aufbaus kann der Draht unter definierte Spannung gebracht und mit hoher Geschwindigkeit (bis zu 15 m/s) abgespult werden.

Damit der Draht zum Schneiden von Silicium genutzt werden kann, muss er mit einer Schneidemulsion (engl.: *slurry*) – typischerweise ein Gemisch aus Polyethylenglykol und Siliciumcarbid-Pulver – benetzt werden. Dies geschieht mit Hilfe von Düsen, die oberhalb des Drahtfeldes angebracht sind.

Der schnell bewegte Draht führt die Slurry mit und presst diese beim Schneidvorgang gegen den Silicium-Block. In der hydrodynamischen Slurry-Umgebung werden die einzelnen SiC-Partikel durch Scherkräfte zum Rollen angeregt und zusätzlich durch den Drahtvorschub mit einer Normalkraft beaufschlagt. Damit können lokal hohe Drücke erzeugt werden, die zum Abplatzen von Siliciumpartikeln führen können.

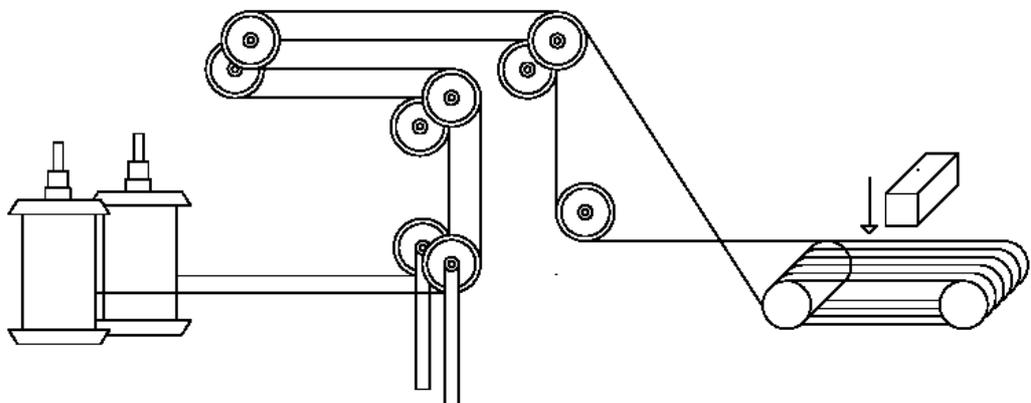


Abbildung 1 Prinzipieller Ablauf des Drahtsägens.

Da der Schnittprozess mit losen Schneidkörnern durchgeführt wird, bezeichnet man das Drahtsägen korrekterweise als Draht-Trennläppen. Umgangssprachlich hat sich jedoch der Begriff „Drahtsägen“ etabliert.

Wegen der komplexen Vorgänge im Schneidspalt und dem hohen experimentellen Aufwand für Schnittversuche sind grundlegenden wissenschaftliche Untersuchungen zum mikroskopischen Ablauf des Schneidprozesses nicht sehr weit gediehen. Die prinzipiellen mikroskopischen Vorgänge („rollendes, indentierendes

Korn“) werden zwar einvernehmlich postuliert, jedoch sind bisher keine umfangreichen Studien zur vollständigen Modellierung des Prozesses, dem experimentellen Abgleich sowie einer messtechnischen Validierung bekannt.

Durch die Installation des DrahtsägeLABs sind solche Untersuchungen nun möglich und sollen in Folgeprojekten durchgeführt werden.

2 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Im Folgenden sind die wichtigsten Aktivitäten und Ergebnisse, die im Rahmen dieses Projektes erarbeitet wurden, dargestellt.

Teil A:

- *Spezifikation, Installation und Inbetriebnahme des neuen Infrarot-Messsystems*
Für den neuen Messaufbau konnten in Verhandlungen mit dem Hersteller Aescusoft sowohl die im Hinblick auf die geplanten Entwicklungsarbeiten notwendigen Eigenschaften spezifiziert als auch der sehr wichtige Zugang zur Ansteuerungs- und Auswertesoftware erreicht werden. Die neue CEDIP-Kamera wurde erfolgreich auf ihre Eignung zur Aufnahme von Lock-In-Bildern der freien Ladungsträgerdichte in Siliciumscheiben getestet.
- *Detaillierte Analyse der Eigenschaften*
Das neue CEDIP-Kamerasystem wurde im Hinblick auf die erforderlichen Leistungswerte im Detail getestet. Die Tests verliefen erfolgreich. Eine Zusammenfassung wird in Abschnitt 3.2 gegeben.

Teil B:

- *Installation des Drahtsägelabors zum Schneiden von dünnen Siliciumwafern*
Im Rahmen des Projektes wurde das Drahtsägelabor installiert. Es beinhaltet alle notwendigen Installationen, um Silicium-Kristalle (Ingots) aufzukleben und zu trennen. Weiterhin kann manuell vereinzelt werden und die Wafer nachfolgend einer Standard-Industriereinigung mit Megaschallbädern unterzogen werden.
- *Einfahren der Drahtsäge zur Herstellung von industrietypischen Wafern*
Die Drahtsäge wurde in Betrieb genommen und erste Schnittversuche zur Bestimmung der minimal notwendigen Beladung durchgeführt. Durch Variation der Beladung zwischen 25 und 275 mm und Charakterisierung der geschnittenen Wafer konnte nachgewiesen werden, dass die Beladung keinen Einfluss auf die geometrischen und mechanischen Qualitäten der Wafer hat. Damit können nachfolgende Schnittversuche mit minimaler Beladung durchgeführt werden.
- *Vergleich der Eigenschaften von Wafern, die mit losen bzw. gebundenem Korn geschnitten wurden*
Da die Drahtsäge auch über die System zur Nutzung von diamantbeschichtetem Draht verfügt, wurden Versuche zum Vergleich dieser grundlegend unterschiedlichen Schnittarten durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die Schädigungstiefe bei Verwendung von Diamantdraht um ca. 25% und der Schnittverlust um etwa 40-50 µm reduziert werden konnte. Damit wäre das Diamantdrahtschneiden eine attraktive Alternative zum Slurry-Schnitt, sobald die Kosten für den Diamantdraht entscheidend reduziert werden können.

3 Arbeitsergebnisse aus Teil A

3.1 Aufbau, Spezifikationen und Messungen der Ladungsträgerdichte mit dem neuen Kamerasystem

Die wichtigste Anwendung des neuen Systems ist die Abbildung der freien Ladungsträgerdichte und daraus der Trägerlebensdauer (CDI: Carrier-Density-Imaging). Das Prinzip der Aufnahme von Bildern der freien Ladungsträgerdichte ist in Abbildung 2 dargestellt.

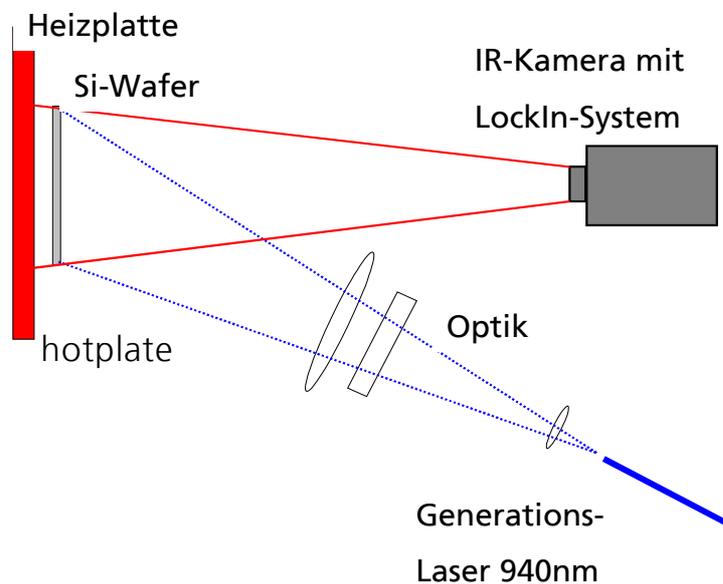


Abbildung 2: Prinzip der CDI-Messmethode

Freie Ladungen werden über einen Generationslaser erzeugt. In unserem Fall werden zur Generation zwei im 180°-Winkel angeordnete 60W Diodenlaserköpfe der Fa. Limotschenko eingesetzt. Diese Anordnung ermöglicht zusammen mit einer speziell entwickelten Mikrolinsenoptik eine Ausleuchtung einer Fläche von 210x210 mm² mit weniger als 5 % Inhomogenität.

Die wesentliche Komponente des neuen IR-Messsystems ist die IR-Kamera CEDIP Silver 480 M. Die Eigenschaften der Kamera wurden umfassend getestet, eine Zusammenfassung findet sich in Abschnitt 3.2

Ein Beispiel für den Einsatz des neuen Messsystems zur Aufnahme von CDI-Bildern zeigt Abbildung 3. Der Vergleich mit dem bisherigen Messsystem auf der Ebene der Kameradigits (Abbildung 4) demonstriert die vergleichbare Empfindlichkeit.

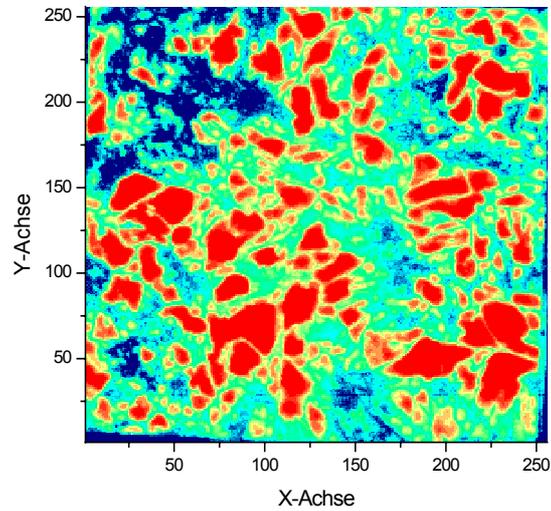


Abbildung 3: CDI-Bild (Kamerasignal in a.u.) aufgenommen mit der CEDIP-Kamera

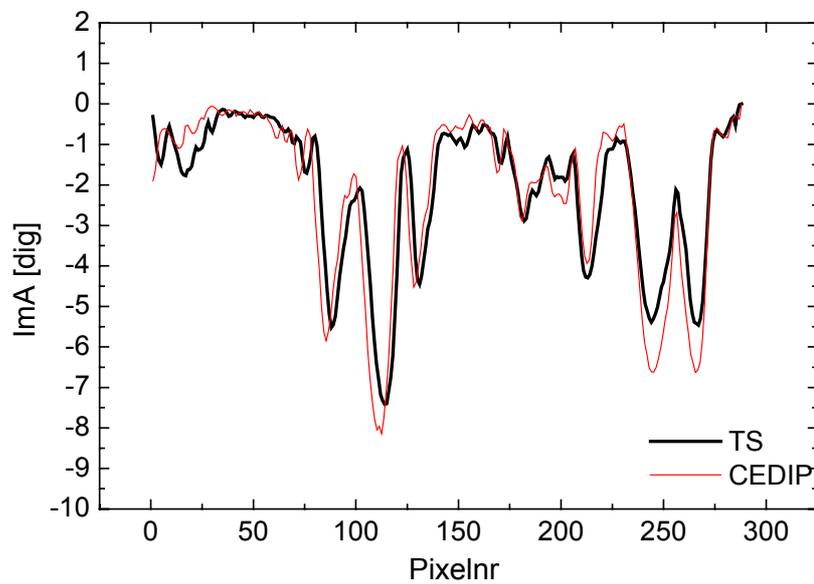


Abbildung 4: Test der Vergleichbarkeit der Empfindlichkeit zwischen dem bisherigen System (TS) und dem aktuellen System (CEDIP).

3.2 Detaillierte Tests zur Validierung der Eigenschaften des neuen Systems

3.2.1 Kamerarauschen

Ein wichtiger Faktor bei der Erreichung höherer Bildraten mit dem neuen System ist, dass diese nicht durch erhöhtes Rauschen erkauft sein dürfen. Es wurden daher für eine Serie von Bildraten jeweils ein Satz von 100 Bildern eines homogenen schwarzen Körpers aufgenommen. Die Standardabweichung des Signals von jedem Pixel ist als Maß für das Rauschen des Pixels in der folgenden Abbildung für 100 und 383 Hz aufgetragen.

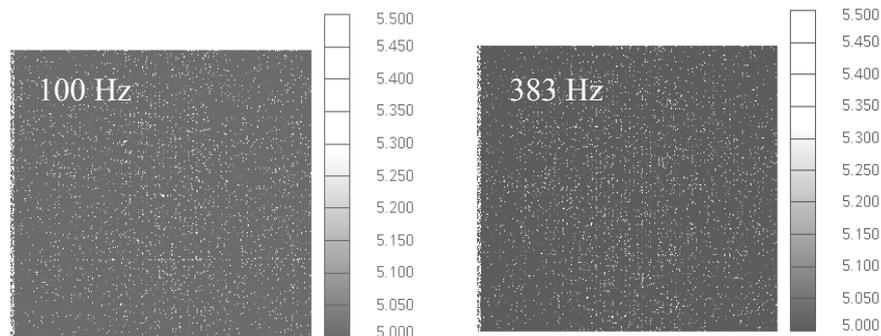


Abbildung 5: Vergleich des Pixelrauschens bei einer niedrigen und einer hohen Bildrate. (Skala in dig)

Es konnte keine signifikante Erhöhung des Rauschens bei höheren Frequenzen im Vollbildmodus festgestellt werden.

3.2.2 Linearität, Dynamik

Es wurde ein Linearitätstest der Kamerapixel durchgeführt. Bei einer Integrationszeit von 2ms wurden je 100 Bilder einer schwarzen Heizplatte mit unterschiedlichen Temperaturen (Nenntemp: 30-80°C, real 28.5-70.7°C, gemessen mit PT-100-Temperaturfühler) aufgenommen. Mithilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes wurde die Photonenflussdichte (in a.u.) zwischen 3.7µm und 5.0µm errechnet und gegen das unkorrigierte Kamerasignal aufgetragen. Die Pixel zeigen sehr homogenes Linearitätsverhalten.

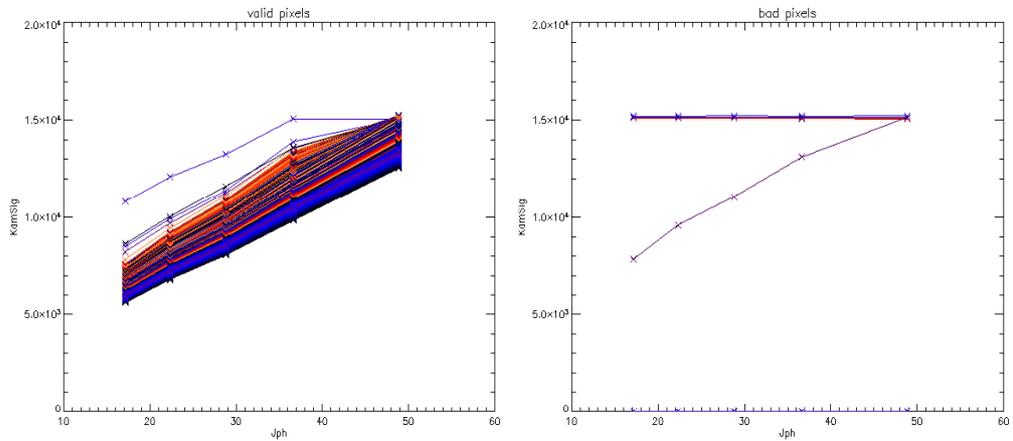


Abbildung 6: Gemessenes Linearitätsverhalten und tote Pixel

Der Kamerachip weist mit 8 -9 toten Pixeln (0.01%) eine sehr niedrige Dichte dieser bei manchen Kamerachips kritischen Größe auf..

Zur Beurteilung der Pixeldynamik wurden Vergleichsmessungen zwischen drei verschiedenen Kameratypen durchgeführt (CMT: bisheriges System, Silver: neues System, Jade: Alternativsystem der Fa. CEDIP):

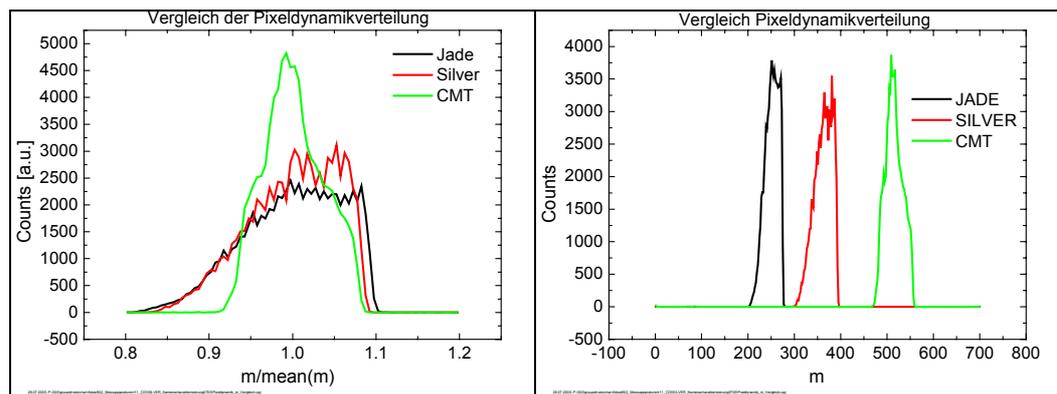


Abbildung 7: Pixeldynamik im Vergleich zwischen verschiedenen Kameras.

3.2.3 Überstrahlung

Um das Überstrahlverhalten zu testen, wurden folgende Messungen durchgeführt:

1. Kantentest:

Ein scharfer Übergang zwischen hohem und niedrigem Kamerasignal wurde beurteilt. Überstrahleffekte traten nur in geringem Umfang auf.

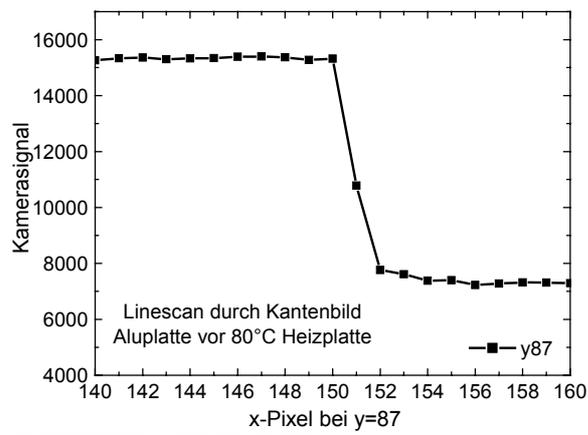


Abbildung 8: Übergang des Kamerasignals bei der Abbildung einer scharfen Kante

2. Blendentest: Eine Irisblende wird bei verschiedenen Öffnungen gemessen.

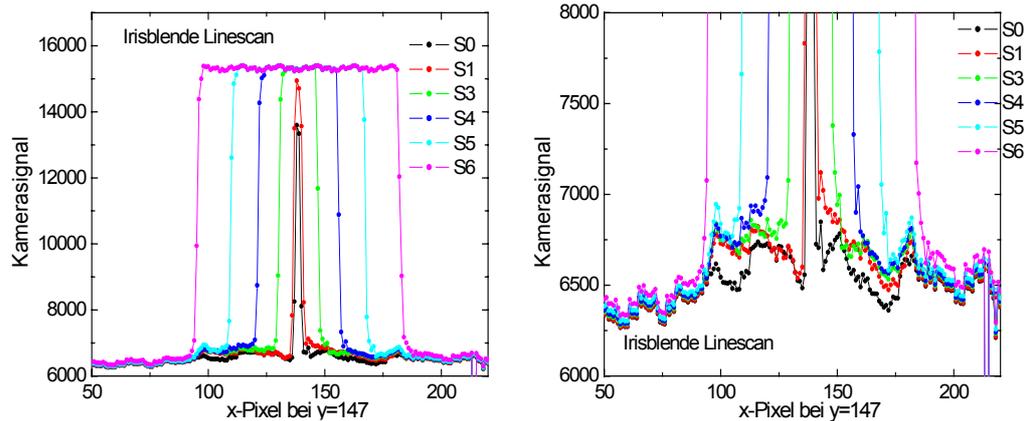


Abbildung 9: Verhalten des Kamerasignals bei der Abbildung einer Irisblende unterschiedlicher Öffnung, rechts mit vergrößerter Auflösung des Signals.

Die Darstellung mit vergrößerter Auflösung zeigt, dass Überstrahlungseffekte sehr gering sind.

Ein Test mit einer Spaltblende ergab ähnliche Resultate.

3.2.4 Übersteuerungsempfindlichkeit

Durch eine halbkreisförmige Öffnung „sieht“ die Kamera eine heiße Heizplatte (80°C). Nach 20min wird die Öffnung gedreht.

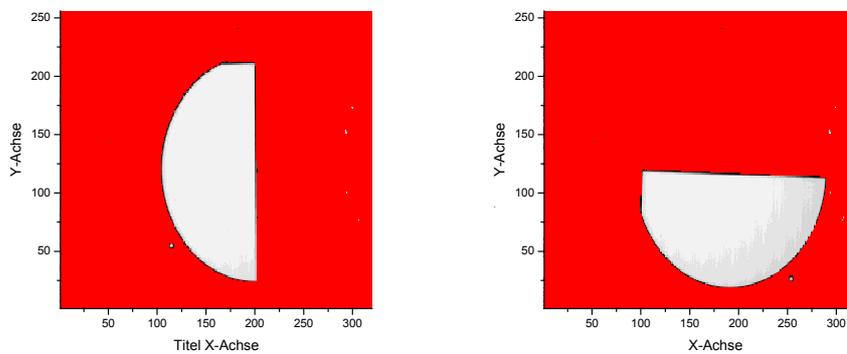


Abbildung 10: Anordnung für den Test der Übersteuerungsempfindlichkeit

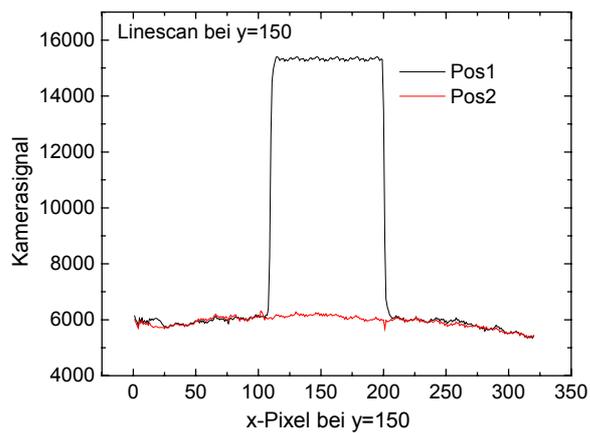


Abbildung 11: Vertikaler Schnitt in der Höhe y=150

Es konnte kein negativer Einfluss als Folge der vorhergehenden Übersteuerung festgestellt werden.

3.2.5 Signalkonstanz

Die Kamera braucht ca. 30min, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. bis ein erneuter NUC (non-uniformity correction) keine wesentliche Änderung ergibt. Der Absolutwert des Kamerasignals driftet dann innerhalb von weiteren 3h nur noch geringfügig:

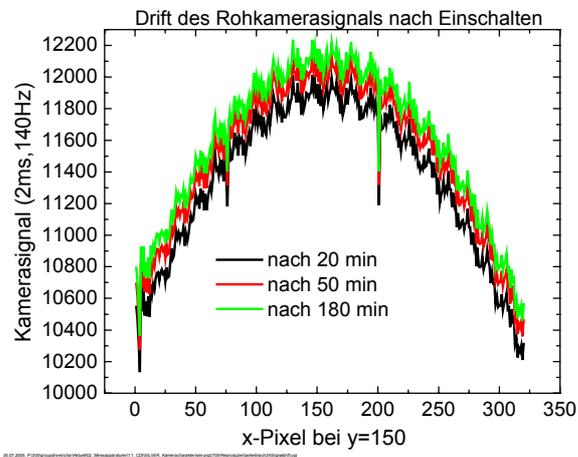


Abbildung 12: Driftverhalten des Kamerasignals

Das Driftverhalten ist mit 2 % zwar noch nicht kritisch, muss aber eventuell bei Korrekturprozeduren mit in Betracht gezogen werden.

4 Arbeitsergebnisse aus Teil B

Für die zukünftigen Forschungsaufgaben zur Reduktion der Prozesskosten beim Drahtsägen von Silicium wurde ein komplettes Labor aufgebaut. Im Folgenden sollen die einzelnen Komponenten sowie die ersten Ergebnisse beim Einfahren der Anlagen vorgestellt werden.

4.1 Aufbau des Drahtsäge-Labors

Das installierte Drahtsägelabor besteht aus folgenden Teilen:

- Klebe- und Ablösestation
- Drahtsäge
- Reinigungsstrecke.

In Abbildung 13 ist die Klebe- und Ablösestation zu sehen, die für einen Schnittversuch als erstes benötigt wird. Mit Hilfe von Zwei-Komponenten-Kleber wird sowohl eine Glasplatte als Schnittunterlage auf den Werkstückträger geklebt, als auch der Silicium-Kristall auf der Schneidunterlage befestigt (siehe Abbildung 14).



Abbildung 13: Klebe- und Ablösestation, bestehend aus Abspülbecken (zur manuellen Vereinzelung, links im Bild), Hotplate mit Absaugung (zur Kleberlösung, mit Edelstahleinhausung) sowie Werkbank mit Klebe-Schraubzwinde.



Abbildung 14: Silicium-Ingots in der Klebestation, bereit für den Drahtsäge-Schnitt. Das Silicium wurde auf die Glasplatte geklebt, die wiederum auf den Werkstückträger aus Edelstahl geklebt wurde. Der Epoxydharz-Kleber ist als rosafarbene Schicht erkennbar. Für eine gute Haftung werden die zu klebenden Werkstücke in eine Schraubzwinde eingespannt und etwa 4 Stunden getrocknet.

Nach dem Aufkleben auf Glasplatte und Werkstückträger werden die Silicium-Ingots in die Drahtsäge eingebaut und getrennt. In Abbildung 15 ist die Drahtsäge Typ Meyer + Burger DS-265 dargestellt. Der Werkstückträger wird derart in die Maschine eingebaut, dass das Silicium von oben auf das Drahtfeld gefahren werden kann, siehe Abbildung 16.

Ist das Schnittprogramm abgeschlossen, so ist haben die Drahtelemente bis durch den Kleber und teilweise in die Glasplatte geschnitten. Die entstandenen Wafer hängen daher nur noch mit einer Seite über eine dünne Kleberschicht am Glas. Durch die viskose Slurry kleben sie teilweise in Paketen zusammen. Nun muss dieser Wafer-„Kamm“ vorsichtig wieder aus dem Drahtfeld gefahren werden. Dieser Prozess muss sehr langsam und sorgfältig durchgeführt werden, um keinen Drahriss zu verursachen. Diese Prozedur ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 15: Drahtsäge Meyer+Burger DS-265. Im Vordergrund ist das Bedienpaneel zu erkennen. Am linken Rand sind die beiden Drahtspulen und die Umlenkrollen des Drahtspannsystems zu sehen. Auf der rechten Seite befindet sich der Prozessraum, in dem der eigentliche Schneidprozess stattfindet. Im Experiment sind die beiden Schutzhauben geschlossen, um ein Herausschleudern von Teilen und Slurry zu verhindern.



Abbildung 16: Einbau des zu schneidenden Siliciumkristalls in die Vorschubeinheit. Das Silicium wird von oben auf das Drahtfeld gedrückt.



Abbildung 17: Herausfahren des Wafer-„Kamms“ aus dem Drahtfeld. Die mit Slurry benetzten Wafer kleben großflächig zu Paketen zusammen.

Schließlich werden die Waferpakete aus der Drahtsäge entnommen und aufrecht unter heißem Wasser ab gespült. In diesem Schritt wird die Vereinzelung durchgeführt und die einzelnen Wafer in Carrier eingehordet. Diese werden dann in der Reinigungsstrecke der Firma Decker (Modell PSC-MAN, siehe Abbildung 18) gereinigt.



Abbildung 18: Reinigungsstrecke der Firma Decker. Die Wafer werden von links nach rechts durch insgesamt 7 Becken geführt, bevor der Reinigungs- und Trocknungsprozess abgeschlossen ist.

Es handelt sich hierbei um einen industrietypischen Prozess in kleinerem Maßstab. Im ersten Becken werden die groben Verunreinigungen durch Absprühen beseitigt, bevor die Wafer Megashallbäder mit Zusätzen von Reinigungsmitteln (aktive Substanzen: Natriumlauge und Sulfonsäure) durchlaufen. Ein Heißluft-Trockner schließt den Reinigungsprozess ab.

4.2 Versuche zum Einfluss der Maschinenbeladung

Als erste Versuche zum Einfahren der Drahtsäge wurden Schnittversuche mit identischen Standard-Parametern jedoch mit unterschiedlicher Beladung durchgeführt. Dabei wurden multikristalline Silicium-Blöcke der Abmessungen $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}^3$ verwendet. In insgesamt 4 Schnittversuchen wurden 1, 3, 5 bzw. 11 dieser Blöcke geschnitten und die Wafer anschließend analysiert.

Die Wafer wurden wie folgt charakterisiert:

- Messung von mittlerer Dicke, TTV¹ sowie deren Standardabweichung mittels Eichhorn + Hausmann E+H MX203-6-37 (kapazitives Dickenmessgerät)
- Spezifischer Energieverbrauch pro Schnitt

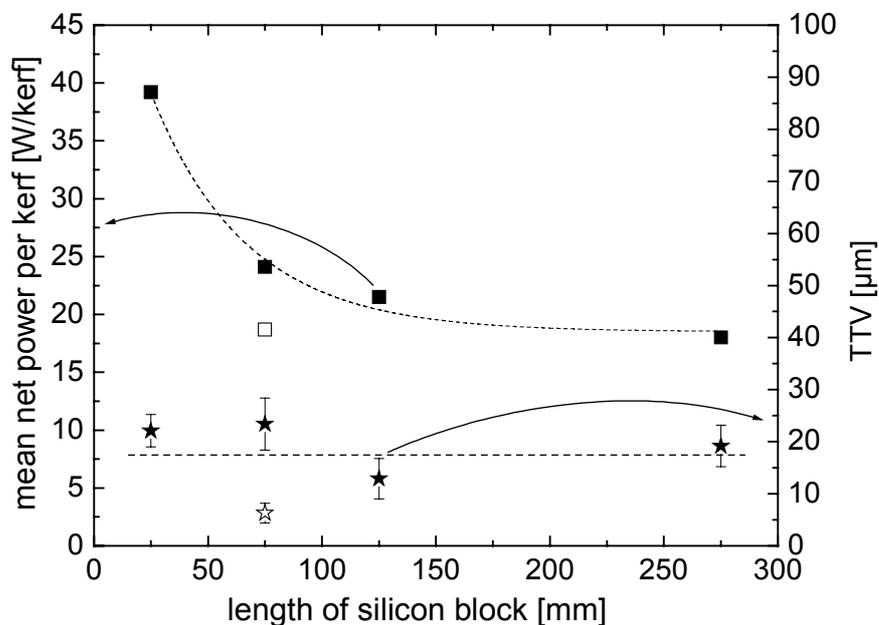


Abbildung 19: Gemessene Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leistung, die je Schnittkerbe benötigt wird sowie des TTV von der Beladung der Säge. Die ausgefüllten Symbole bezeichnen Versuche mit monodirektionalem Schneiden, die offenen Symbole einen Versuch im Pendelbetrieb.

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse für monodirektionales Schneiden (der Draht läuft nur in eine Richtung) sowie einen Versuch im Pendelbetrieb (der Draht läuft zunächst 220 m in die eine Richtung und dann wieder 200 m zurück). Zunächst fällt auf, dass der zumeist entscheidende Waferparameter (das TTV) unabhängig von der Beladung ist. Jedoch konnte überraschenderweise ein in etwa

¹ TTV = total thickness variation, maximaler Dickenunterschied über den Wafer.

monoexponentielles Abnehmen des spezifischen Leistungsaufnahme je Schnittkerbe (gestrichelte Linie) mit zunehmender Beladung festgestellt werden. Hier wäre ebenfalls keine Abhängigkeit erwartet worden, die genauen Hintergründe, wo in der Maschine die zusätzliche Energie bei geringer Beladung verloren geht, sind noch unklar. Auf die geometrischen Qualitäten der Wafer scheint eine geringere Beladung jedoch keinen negativen Einfluss zu haben. Dies war die entscheidende Messgröße, um alle nachfolgenden Versuche mit minimaler Beladung (zwischen 20 und 25 mm Ingotlänge) durchzuführen.

Als alternative Schnittmethode wurde ebenfalls ein Versuch mit mittlerer Beladung im Pendelbetrieb durchgeführt. Dabei wird der Draht nicht ausschließlich in eine Richtung bewegt, sondern oszillierend vor und zurück gefahren. Durch eine geringfügige Differenz zwischen Vor- und Rückbewegung ergibt sich in der Summe eine langsame Vorwärtsbewegung.

Im Forschungsbetrieb ergeben sich vor allem Vorteile in den Drahtkosten. Da der Draht üblicherweise – unabhängig von der geschnittenen Ingot-Länge – nach einmaligem Schneiden entsorgt werden muss, sind die relativen Kosten speziell für das Schneiden kurzer Ingots hoch. Im Pendelbetrieb wird nur ein Bruchteil einer Drahtrolle für einen Schnitt benötigt (etwa 1/7) und die laufenden Kosten können erheblich gesenkt werden. Die Nachteile liegen in einer deutlich sichtbaren Riefenbildung auf der Oberfläche, die durch die ständig wechselnde Drahtgeschwindigkeit und die Umkehrung der Sägerichtung bedingt sind. Dies wird jedoch wiederum dadurch kompensiert, dass die Keiligkeit der Wafer (d.h. der Dickenunterschied zwischen der „dünnen Seite“ des Drahteintritts und der „dicken Seite“ des Drahtaustrittes gegenüber dem monodirektionalen Schneiden drastisch reduziert wird. Die Prozesstauglichkeit der pendelgesägten Wafer zu Solarzellen muss jedoch in Folgeprojekten grundlegend getestet werden.

4.3 Vergleich der Schnittprozesse mit losem und gebundenem Korn

Da der Anteil der Slurry an den gesamten Schnittkosten relativ hoch ist und diese zudem aufwändig in anschließenden Reinigungsprozessen entfernt werden muss, wird ein alternatives Schnittverfahren mit gebundenem Korn evaluiert. Dabei ist der Stahldraht mit Industriediamanten besetzt, die den Abtrag bewirken. Damit entfällt die Notwendigkeit einer Slurry mit Zusätzen von Schneidpartikeln und es kann Wasser mit geringfügigem Zusatz von Schmier- und Benetzungsmitteln (bspw. Alkohole) verwendet werden.

Im Schnittprozess mit Diamantdraht kommt es zu einem grundlegend veränderten Abtragsmechanismus. Anders als beim Slurry-Betrieb, der auf dem Abrollen und Eindrücken einzelner SiC-Körner beruht, kratzen die fixierten Diamanten über die Oberfläche. Dies ist in typischen REM-Aufnahmen deutlich zu sehen, vgl. Abbildung 20.

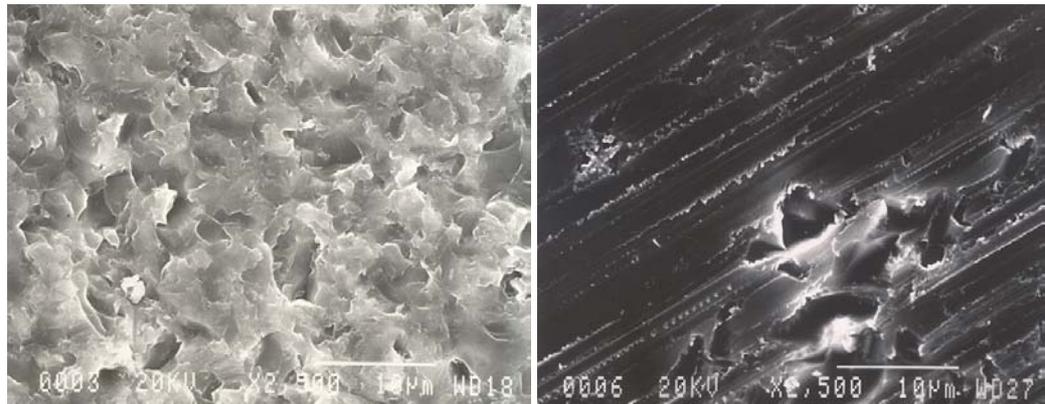


Abbildung 20: REM-Aufnahme der Waferoberfläche direkt nach dem Drahtsügeschnitt. Links: Schnitt mit losem Korn, rechts: Schnitt mit gebundenem Korn (Diamantdraht)

In einem ersten Versuch wurde ein 20 mm langer Block mit Diamantdraht geschnitten, wobei ein Rezept des Maschinenherstellers eingesetzt wurde, das einen etwas reduzierten Vorschub (0.4 statt 0.5 mm/min) verwendete. Die geometrischen Messungen im Vergleich zum Standard-Slurry-Schnitt eines Ingots sind in Tabelle 1 dargestellt.

Schnittverfahren	Dicke [μm]	TTV [μm]	Warp [μm]	Schnittverlust [μm]
Diamantdraht (d=150 μm)	318.3 \pm 7.5	30.8 \pm 10.6	16.0 \pm 9.3	162
Slurry + Stahldraht (d=160 μm)	269.8 \pm 2.3	22.1 \pm 4.0	16.6 \pm 3.5	210

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen geometrischen Parameter von Wafern, die mittels Diamantdraht- bzw. Slurry-Prozess geschnitten wurden.

Es fällt auf, dass der Schnittverlust beim Diamantdrahtversuch deutlich geringer ist (um 48 μm bzw. 23%), obwohl der Drahtdurchmesser des Diamantdrahtes nur 10 μm kleiner ist. Dies liegt daran, dass die frei beweglichen SiC-Partikel in der Slurry zu einer verbreiterten Schnittkerbe beitragen.

Bezüglich des TTV besteht noch Verbesserungsbedarf, jedoch liefert die Warp-Messung ein Indiz dafür, dass die induzierten Spannungen in den diamantgesägten Wafer nicht größer als beim Standard-Prozess sind.

Da der Abtragsmechanismus beim Diamantdrahtschneiden grundlegend anders ist als beim Slurry-Prozess, wurde jeweils ein Wafer am Fraunhofer IWS in Dresden mit einer laser-akustischen Methode (LAWave) auf ihre Schädigungstiefe hin untersucht. Dabei ergab sich ein erheblicher Unterschied: Der mit Slurry geschnittene Wafer

zeigte eine Schädigungstiefe von etwa 20 μm , der Diamantdraht-Wafer lediglich 15 μm – eine Reduktion um 25%.

Sollten die Kosten des Diamantdrahtes (die z.Zt. in etwa das 100- bis 1000-fache der Stahldrahtkosten betragen) in Zukunft drastisch gesenkt werden können, so würde der Schnittprozess mit gebundenem Korn zu einer echten Alternative für den Slurry-Prozess. Die Hauptvorteile liegen darin, dass

1. nicht bei jedem Schnitt ein neues Drahtfeld aufgezogen werden muss, da der Draht mehrfach wiederverwendet werden kann,
2. die hohen Slurrykosten (SiC + PEG) wegfallen, da Wasser mit geringen Alkoholzusätzen verwendet werden,
3. sich die Reinigung deutlich vereinfacht und
4. bei verringerter Schädigungstiefe der Nachätzprozess verkürzt werden kann.

Für eine abschließende Bewertung müssen jedoch weitere Experimente sowie die Prozessierung der Wafer zu Solarzellen durchgeführt werden.

5 Kosten- und Marktanalyse

5.1 Marktübersicht

Gemäß der aktuellen Sarasin-Studie „Solar Energy 2005“ vom November 2005 wird die aktuelle Produktionskapazität an Solarwafern auf 1.3 GW_p geschätzt. Dies entspricht etwa 350 Millionen Wafern der Größe 156x156 mm² bei ca. 15% Zellwirkungsgrad. Alle diese Wafer und zudem alle Silicium-Wafer der Mikroelektronik werden durch Drahtsägen getrennt. Zusammen mit der aktuellen Silicium-Knappheit ergibt sich ein enormer Innovationsdruck im Hinblick auf das Schneiden dünnerer Scheiben in kürzerer Zeit und mit geringerem Schneidverlust.

Die mit dem Aufbau des Drahtsägelabors ermöglichte Flexibilität des Schnittprozesse erlaubt das Angebot von maßgeschneiderten Forschungsprojekten für die Photovoltaikindustrie. Neben dem industrienahen Trennen von großen Blöcken (bis zu 210x210x300 mm³) können alle zukunftssträchtigen Prozessvarianten (Pendeln, Schaukeln, Diamantdrahtsägen) im Vielspaltprozess realisiert werden.

Nach Bekanntmachung der Installation des Labors wurden bereits einige interessante Industriekontakte geknüpft, die zu Anschlußprojekte führen könnten.

6 Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

D. Kray, S. Baumann, K. Mayer, F. Haas, M. Schumann, M. Bando, A. Eyer and G. P. Willeke, *Wafering Research at Fraunhofer ISE*, 15th NREL Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, August 7 - 10, 2005 - Vail, Colorado, USA

M. Schumann, *Untersuchungen zur Herstellung von dünnen Wafern für Silicium-Solarzellen mit einer Multi-Wire-Slurry-Saw*, Diplomarbeit, TFH Wildau, 2005