



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



**Institut für Fertigungstechnik und  
Photonische Technologien**  
Getreidemarkt 9/BA/OG 8  
A-1060 Wien  
<http://www.ift.at>

Herrn  
Univ.Prof. Dr. Dennis Kochmann  
Delegate of Doctoral Affairs

D-MAVT Doctoral Administration  
ETH Zürich, LEE K 208  
Leonhardstrasse 21  
CH-8092 Zürich

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.  
Friedrich Bleicher**  
Institutsvorstand  
T +43 1 58801 31101  
F +43 1 58801 931101  
M +43 664 60 588 3110  
E [bleicher@ift.at](mailto:bleicher@ift.at)

Ihr Zeichen / Ihre Nachricht vom  
- / 09.09.2019

unser Zeichen

unser Bearbeiter / Nebenstelle  
Bleicher / 31100

Datum  
15.10.2019

### **Gutachten zur Dissertation**

„Experimental Investigation and Modeling of Diamond Wire Sawing of Single-Crystal Silicon“

vorgelegt von Herrn Uygur Pala, MSc.

#### *Zielstellung*

Verbunden mit dem überproportionalen Anstieg des Ölpreises um das Jahr 2012 wurde in der produktionstechnischen Forschung das Thema der Energieeffizienz sehr intensiv aufgegriffen. Es wurden Optimierungsansätze zu Fertigungsprozessen und Produktionsanlagen entwickelt, wobei man sich einerseits auf die Fertigungsprozesse und Maschinenkomponenten (z.B. Fluidtechnik/Hydraulik) fokussierte aber auch gesamtsystemische Untersuchungen durchführte. Die aktuelle öffentliche Diskussion um die Klimaveränderung verleiht dem Themenbereich eine neue Ausrichtung und es werden neue technologische Fragestellungen aufgeworfen. Die Dekarbonisierung unserer Energiewirtschaft eröffnet damit neue Forschungsfragen. In Zusammenhang mit der globalen Fragestellung einer CO<sub>2</sub>-neutralen/-reduzierten Energieversorgung verzeichnet die Photovoltaik-Industrie anhaltendes Wachstum. So hat sich in den letzten zehn Jahren die global installierte PV-Kapazität um mehr als Faktor 10 erhöht. Diesem Umstand geschuldet ist auch ein gesteigertes Interesse von Industrie und Wissenschaft zu verzeichnen, die Technologien zur Herstellung von Siliziumwafern zu beforschen und die Produktivität signifikant zu steigern. Die von Herrn Uygur Pala MSc. vorgelegte Arbeit greift dieses Thema auf und fokussiert auf die Betrachtung des Diamantdraht-Sägeprozesses zur Trennung von Waferscheiben aus dem Einkristall-Silizium-Barren (Ingot). Dieser Prozess wird in der Prozesskette zur Herstellung von Wafern als ein Herstellkosten-bestimmender

Prozessschritt identifiziert, welchem rund 30% der Gesamtkosten zugeordnet werden. Zur Trennung des Barrens ist das Diamantdraht-Sägen das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Herstellung von Wafern aus monokristallinem Silizium. Beim Diamantdraht-Sägen wird ein mit Diamantkorn besetzter Stahldraht verwendet, wobei das Diamantkorn über eine galvanische Bindung (Nickel) auf dem Draht gehalten wird. Der Diamantdraht wird von einer Abwickelspule mit definierter Drahtgeschwindigkeit abgewickelt und am Drahteinlauf über Drahtführungsrollen zugeführt sowie letztlich mehrmals über Umlenkrollen geführt. Der Siliziumbarren taucht mit entsprechender Vorschubgeschwindigkeit von rund 200  $\mu\text{m}/\text{min}$  bis 5  $\text{mm}/\text{min}$  in das Drahtfeld ein. Am Drahtauslauf wird dieser schließlich über eine Aufwickelspule wieder aufgewickelt. Das Diamantdraht-Sägen von Silizium stellt einen komplexen Prozess dar, welcher durch das spröde Materialverhalten des Siliziums geprägt ist. Durch die geometrisch unbestimmten Schneiden unterschiedlicher Größe erfolgt eine Kombination von duktilem und sprödem Zerspanungsverhalten. Der Verschleiß am Schneidkorn bewirkt eine veränderliche Prozesskinematik. Herr Pala greift damit einen komplexen und äußerst interessantes Bearbeitungsverfahren auf, deren Mechanismen und Einflusseffekte zurzeit noch nicht vollständig verstanden sind. In der vorgelegten Arbeit widmet sich der Kandidat zunächst experimentellen Untersuchungen, um das Prozessverständnis zu den Zerspanungs- und Verschleißmechanismen zu vertiefen. Auf Basis dieser Erkenntnisse entwickelt Herr Pala verschiedene Modellierungsansätze, mit deren Hilfe es gelingt, den Prozess auf makro- und mikroskopischer Ebene zu beschreiben und das Verständnis zu den Mechanismen der Oberflächengenerierung sowie zum Kornverschleiß zu erweitern. Herr Pala untergliedert seine Arbeit in folgende inhaltliche Schwerpunkte:

#### *Wissenschaftlicher Inhalt*

In Kapitel 1 zeigt Herr Uygur Pala die Entwicklung der Photovoltaik auf und führt in das Thema der Multi-Diamantdraht-Sägebearbeitung unter Einsatz eines Stahldrahts mit galvanisch gebundenem Diamantkorn ein. Er skizziert die wirtschaftliche Bedeutung dieses Bearbeitungsprozesses als Wettbewerbsfaktor und leitet abschließend, in Unterkapitel 1.3, auch die Motivation für seine wissenschaftliche Arbeit ab. Daran lässt Herr Pala in Kapitel 2 einen inhaltlich ausführlichen und sorgfältig recherchierten Überblick über den Stand der Technik und der Forschung zur Diamantdraht-Sägebearbeitung anschließen, wobei insbesondere für sprödharte Werkstoffe die Einflussgrößen auf die Zerspanungsmechanismen sowie das duktile und spröde Zerspanungsverhalten mit dem Übergang zwischen beiden Prozesszuständen thematisiert werden. Der Kandidat behandelt dabei das elasto-plastische Verhalten in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Schneidkorn. Für die späteren Ausarbeitungen in seiner Arbeit gibt Herr Pala in diesem Abschnitt auch noch einen Überblick zu Einkornritzversuchen. Mit einem Überblick zu Modellierungsansätzen schließt Herr Pala seinen Überblick zum Stand der Technik. Auf Basis dieser grundlegenden Betrachtungen leitet Herr Pala im nachfolgenden Kapitel 3 den Forschungsbedarf und die Zielsetzung seiner wissenschaftlichen Arbeit ab.

In Kapitel 4 lässt er die Beschreibung seiner Versuchsaufbauten für die experimentellen Untersuchungen und die dabei eingesetzten Methoden folgen. Hierbei fasst Herr Pala die Aufbauten seiner Versuchsstände zunächst zusammen und führt auf die Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen über. Er führt dabei eine Versuchsanordnung ein, in der er den Sägedraht auf einem Trägerkörper aufwickelt (wire wrapped grinding wheel setup, WWGW) und dergestalt auf einer Werkzeugschleifmaschine mehrere Diamantdrähte in Versuchen mit

Korneingriffslängen von bis zu 65 mm und bei Schnittgeschwindigkeiten von bis zu 75 m/s getestet. Für eine Anordnung des Experiments mit einer Werkstückwerkstoff-Probe in vertikaler Ausrichtung zeigt er die kinematischen und prozessspezifischen Zusammenhänge. Ein zweiter Versuchsstand ermöglicht Herrn Pala die Durchführung von Einkornritzversuchen mit Erfassung der Prozesstemperatur über ein Zwei-Farben-Pyrometer. Mit Hilfe der Versuchsstände kann Herr Pala das Verschleißverhalten von einzelnen Körnern über die gesamte Standzeit beobachten. Ergänzend beschreibt Herr Pala auch die eingesetzten Messmittel sowie die Auswertalgorithmen z.B. für die Bildauswertung zur Bestimmung der Schleifkornverteilung.

In Kapitel 5 widmet sich Herr Pala der Untersuchung der Diamantdrahtoberfläche und deren Einfluss auf die Prozesskräfte, dem auftretendem Schleifkornverschleiß und der resultierenden Oberflächencharakteristik bei Schnittgeschwindigkeiten von 15 m/s bis zu 75 m/s und Vorschüben von 10  $\mu\text{m}/\text{min}$  bis zu 1.200  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Anhand dieser Versuche kann Herr Pala den Einfluss der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächengüte des Werkstücks experimentell ermitteln und unter Anwendung der Oberflächenanalysesoftware quantifizieren. Er kann somit den Einfluss der Zerspanungsparameter auf das spröde und duktile Prozessverhalten erklären und den Einfluss der Drahteigenschaften auf Prozesskräfte und Oberflächenqualität des Siliziums bestimmen.

In Kapitel 6 entwickelt Herr Pala ein modulares, empirisches Zerspanungsmodell zur Diamantdraht-Sägebearbeitung. Zusammen mit einem Werkzeugmodell, welches ein stochastisches Drahtmodell umfasst und ein kinematisches Prozessmodell beinhaltet, gelingt es dem Kandidaten, den Materialabtrag modellbasiert zu beschreiben. Durch den damit quantifizierbaren Korneingriff kann Herr Pala auf Basis eines mechanistischen Modellansatzes nach Kienzle die Prozesskräfte ermitteln. Konsequenter Weise wendet sich Herr Pala dann der Frage zu, wie der Kornverschleiß die Entwicklung der Prozesskräfte beeinflusst. Dieser sehr interessanten wissenschaftlichen Fragestellung widmet er sich in Kapitel 7 und adaptiert das Verschleißmodell von Takeyama für die Anwendung der Untersuchung des Kornverschleißes im Diamantdraht-Sägen. Die daraus resultierende Differentialgleichung löst er numerisch unter Zuhilfenahme von Matlab ODE-Solver. Herr Pala evaluiert diesen Modellansatz für Schnittgeschwindigkeiten von 30 m/s und 60 m/s bei einem Vorschub von 1,8 mm/min und kann eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen nachweisen. Er ergänzt das Verschleißmodell noch um ein Temperaturmodell und kann auch dazu eine gute Übereinstimmung zu experimentellen Ergebnissen nachweisen. Anschließend, in Kapitel 8, verwendet Herr Pala das modulare Prozessmodell mit der kinematischen und stochastisch-geometrischen Beschreibung des Sägedrahts, zusammen mit dem Materialabtragmodell, dem Kraftmodell, dem Korn-Temperaturmodell und dem Kornverschleißmodell, und zeigt erfolgreich dessen Anwendung. Dabei umfasst das Drahtmodell bis zu 9.000 aktive Diamantkörner mit bis zu 1.000 unterschiedlichen Korngemetrien. Das 3D-Modell reduziert Herr Pala dann zu einem 2D-Modell, um die Berechnungszeiten zu senken. Für die oben genannten Prozessparameter berechnet er beispielsweise die Entwicklung der Spannungszustände über die Standzeit. Die Zusammenfassung in Kapitel 9 mit Ausblick auf weiterführende Entwicklungsansätze und ergänzende experimentelle Arbeiten schließen die Arbeit und rundet die Gesamtbetrachtung ab.

Herrn Pala gelingt es damit, die Wirkmechanismen zwischen resultierender Oberflächengüte und der Mikro- und Makro-Einflüsse auf das Diamantdraht-Sägen zu analysieren. Er zeigt, dass durch den Einsatz seines modularen Simulationsmodells ein vertiefenderes Verständnis der

Wirkmechanismen in der Zerspanung von monokristallinem Silizium mit geometrisch unbestimmter Schneide erreicht werden kann. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Versuchsstände und die Modellierung zur kombinierten Prozess-, Zerspanungsvorgang und Qualitätsanalyse eröffnet neue Möglichkeiten in der Prozessentwicklung der Herstellung von Silizium-Wafern. Mit der vorgelegten Arbeit ist es Herrn Pala gelungen, ein hochkomplexes fertigungstechnisches Problemfeld systematisch in Einzelfragen zu zerlegen und die auftretenden Teilfragen mit angemessenen Experimenten und Modellierung abzubilden. Dies erlaubt es zukünftig, Diamantsäge-Prozesse erkenntnisorientiert auszulegen. Die von Herrn Uygur Pala MSc. vorgelegte Arbeit liefert einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Effizienz in der Wafer-Fertigung und zeigt einen hohen Grad an Originalität. Sie entspricht den Anforderungen, die an eine Dissertationsschrift zu stellen sind.

#### *Form und Ausdruck, Gesamteindruck*

Herr Pala hat mit der vorgelegten Arbeit gezeigt, dass er es versteht, selbständig wissenschaftlich und mit systematischer Vorgehensweise zu arbeiten. Die Dissertation, die in englischer Sprache verfasst ist, überzeugt durch einen strukturierten Aufbau und durch eine sorgfältige Darlegung der für die Entwicklung der Arbeit relevanten Methoden. Die Ergebnisse sind in klarer textlicher Beschreibung und auf Basis von anschaulichen Abbildungen dargelegt. Den Anforderungen an eine Dissertation in Form und Ausdruck wird die vorgelegte Arbeit gerecht. Es wird aber empfohlen, vor einer Veröffentlichung der Dissertationsschrift noch kleinere Korrekturen in den textlichen Formulierungen vorzunehmen.

#### *Bewertung*

Zusammenfassend empfehle ich daher dem Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich die Annahme der vorgelegten Arbeit und die Fortführung des Promotionsverfahrens. Herr Uygur Pala MSc. ist aus Sicht des Unterzeichneten unter der Auflage zu textlichen Anpassungen in seiner Arbeit zur Weiterführung seines Dissertationsverfahrens zuzulassen.

Wien, den 18.10.2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'F. Bleicher', written in a cursive style.

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Friedrich Bleicher  
Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien  
Technische Universität Wien