

Eigenfrequenzbestimmung von Wafern

Natural frequencies determination of wafers

Tobias Müller¹
Thorsten Schmidt¹
Sebastian Rank¹
Germar Schneider²

¹*Professur für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dresden*

²*Infineon Technologies Dresden GmbH*

Wafer werden in modernen Halbleiterfabriken mit automatisierten, schienengebundenen Deckenfahrzeugen (OHT) durch die Fertigungslinien transportiert. Die dabei entstehenden Schwingungen, z. B. durch Schienenstöße oder durch Hub- und Senkvorgänge, werden auf den Transportbehälter und schließlich auf die Wafer übertragen. Stimmt die Betriebsfrequenz aus dem Transport mit der Eigenschwingung des jeweiligen Wafers überein, entsteht eine Resonanz, die zum Bruch der Wafer und hohen wirtschaftlichen Schaden führen können. Um dies zu vermeiden, müssen die Eigenfrequenzen der beteiligten Systemelemente untersucht werden. In einem Schwingprüfstand wurden die Eigenfrequenzen von Wafern separat und in Verbindung mit ihrer Transportbox, dem Front Opening Unified Pod (FOUP) bestimmt. Dabei wurde der FOUP wie im Betrieb hängend an der dafür vorgesehenen Halterung befestigt und mit einem Schwingerreger erregt. Mithilfe einer Modalanalyse im FE-Modell konnten die Eigenfrequenzen und Frequenzverläufe ermittelt sowie die Schwingformen an den jeweiligen Messpositionen reproduziert werden. Weiterhin wurden simulativ wie auch experimentell schwingungsmindernde Maßnahmen durchgeführt. Die Ergebnisse sehen eine Versteifung der Halterung des FOUP als wirksamste Lösung.

[Schlüsselwörter: Wafer, FOUP, Schwingungstests, Eigenfrequenzen, Shaker]

Wafer are transported through the manufacturing lines in modern semiconductor factories with automated, rail mounted and ceiling mounted vehicles (OHT). The resulting vibrations, for example, by shaving or lifting and lowering operations, are transferred to the transport container and finally to the wafers. If the operating frequency from the transport and the natural frequency of the respective wafer is accord, a resonance is formed, which can lead to the breakage of the wafers and high economic damage. In order to avoid this, the

natural frequencies of the involved system elements have to be investigated. In a vibration test bench, the natural frequencies of wafers were determined separately and in conjunction with their transport box, the Front Opening Unified Pod (FOUP). As in operation, the FOUP was hanging mounted on the provided fixture and excited with a shaker. By means of a modal analysis in the FE simulation, the natural frequencies and frequency profiles were determined and the vibration forms were reproduced at the respective measuring positions. Furthermore, simulations as well as experimentally vibration reducing measures were carried out. The results see a stiffening of the fixture of the FOUP as the most effective solution.

[Keywords: Wafer, FOUP, vibration test, natural frequencies, Shaker]

1 MOTIVATION

Wafer, das sind Halbleiter-Rohlinge, werden aufgrund elektrischer Effizienz dünner und aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mit größerem Durchmesser gefertigt. Eine Veränderung der Geometrie sowie der Einsatz neuer Technologien zum Prozessieren der Wafer gehen mit einer Änderung seiner Eigenfrequenz einher. Stimmt die Erregerfrequenz aus dem Transport mit der Eigenfrequenz des Wafers überein, kommt es zur Resonanz, die zu einem Anstieg der Schwingungsamplitude und dadurch zum Bruch des filigranen Wafers führen kann. Transportiert werden die Wafer in einem sogenannten FOUP (Front Opening Unified Pod). In diesem FOUP werden die Wafer kassettenartig übereinander gelegt. Bricht ein Wafer, im ungünstigsten Fall ist es der oberste, können durch seine Splitter alle darunterliegenden Wafer zerstört werden. Darum ist es wichtig, im Betrieb die Eigenfrequenzen des im FOUP gelagerten Wafers zu vermeiden.

2 STAND DER FORSCHUNG UND ABGRENZUNG

Schwingungen entstehen im Betrieb, z. B. durch Schienenstöße, durch Hub- oder Senkbewegungen, aber auch durch das An- und Abdocken des Greifers am FOUP. Auch durch den Greifroboter zur Entnahme und Bestückung der Wafer in den FOUP können sich Restschwingungen auf den Wafer übertragen [Wis11], [Xia15]. Dynamische Untersuchungen von 200 mm-Wafern in FOUPs zeigten, dass die am Transportprozess beteiligten Werkzeuge Schwingungen auf den Wafer übertragen, die zu einer Partikelerzeugung und mechanischer Fehlansrichtung sowie Wafer-Walking führen können [Mar98]. Zur Entwicklung sowie Verbesserung von FOUPs wurden ebenso Schwingungsuntersuchungen durchgeführt [Pos09], bei einigen erfolgten auch Schockversuche mit Wafern, die eine Bruchgrenze von 350 m/s² aufzeigen [Sto13]. Eine Möglichkeit, die Eigenfrequenzen akustisch zu ermitteln, zeigt [Mit13], indem die Schwingungen des Wafers, erregt durch einen Shaker, über ein Mikrofon aufgenommen wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die Eigenfrequenz mit der Dicke der Wafer linear korreliert. Für den quadratischen Wafer mit einer Seitenlänge von 156 mm wird eine Eigenfrequenz von 478 Hz angegeben. [She16] stellt eine Variante der Eigenfrequenzermittlung von Kristallwaferoberflächen auch über akustische Oberschallwellen, der SAW-Technologie, vor. Mithilfe dieser Methode konnten das Spektrum, die Schwingform sowie die Wellenausbreitung analysiert werden. [Ste06] verzeichnet Zeitreihen von Stößen und Vibrationen für 300 mm-Wafer, die innerhalb eines FOUP transportiert wurden. Im Ergebnis werden Schwingungs- und Schockgrenzen präsentiert, um Wafer im Betrieb vor Schäden zu schützen. Für die in einem FOUP gelagerten Wafer mit dem Durchmesser von 300 mm werden die Eigenfrequenzen von 30 Hz und 100 Hz angegeben.

Die vorliegende Arbeit, befasst sich mit der Eigenfrequenzermittlung der Wafer im gelagerten FOUP sowie mit Maßnahmen zur Schwingungsminderung. Die Schwingungsuntersuchungen fanden unter Laborbedingungen statt. Ziel ist es, die gewonnenen Ergebnisse mit den Betriebsdaten zu vergleichen, deren Bestimmung ist Inhalt weiterführender Arbeiten, um daraus Maßnahmen zur Resonanzvermeidung für das Transportsystem der Wafer vorzuschlagen. Die Laborversuche betrachten den Wafer-Transport im FOUP, bei dem ein Greifer den FOUP hängend befördert. Demzufolge wurde in den Versuchen der FOUP auch hängend an einer Vorrichtung befestigt. Um die auftretenden Frequenzen im Schwingungsverlauf besser zuordnen zu können, wurden die Eigenfrequenzen des FOUP und des Wafers im gelagerten FOUP im Schwingungssystem getrennt voneinander ermittelt. Anschließend wurden beide Systemelemente miteinander auf ihr Schwingungsverhalten untersucht und ihre gegenseitige Beeinflussung ausgewertet. Des Weiteren wurde ein Finite Elemente-Modell (FE-Modell) erstellt, um mit einer Modalanalyse die Schwingformen des im

FOUP gelagerten Wafers zu erhalten sowie die schwingungsmindernden Maßnahmen auch simulativ zu erfassen.

3 EXPERIMENTIERUMGEBUNG

Die Schwingungsuntersuchungen fanden an einem Schwingungsprüfstand statt, bestehend aus dem elektrodynamischen Schwingerregger (Shaker), mit seiner Regelung und Steuerungseinheit, der Prüfeinheit, die aus Wafer sowie dem FOUP bestehen, und dem Datenerfassungssystem MLab, siehe Abbildung 1.

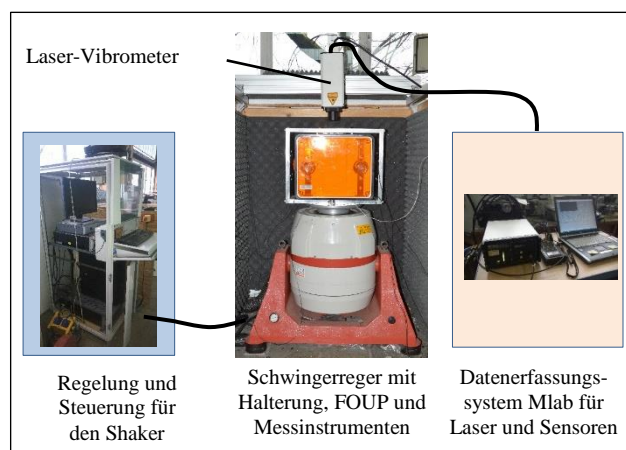


Abbildung 1. Testumgebung für die Schwingungsuntersuchungen

Zur Ermittlung der Schwingungen dienen Beschleunigungssensoren, die an mehreren Stellen am FOUP angebracht sind. Einige dieser Sensoren dienen zur Regelung der reproduzierbaren Erregung des Shakers sowie der Eigenfrequenzbestimmung des Shaker-Systems, andere stehen dem Datenerfassungssystem zur Verfügung. Das Shaker-System bezeichnet an dieser Stelle nicht nur die Erregung durch den Shaker, sondern auch das interne Mess- und Auswerteverfahren des Shakers. Die Ergebnisse des Shaker-Systems werden zwar angezeigt, auf dessen Daten kann jedoch nicht zugegriffen werden. Die Datenerfassung erfolgt darum durch ein vom Shaker-System unabhängig agierendes Datenerfassungssystem MLab, das die Daten der Beschleunigungssensoren sowie die des Laser-Vibrometers speichert. Das Laser-Vibrometer dient zur berührungslosen Schwingungsmessung der Wafer-Oberfläche, da ein auf dem Wafer platzierter Beschleunigungssensor die Schwingungen des filigranen Wafers nicht nur verfälschen, sondern auch dessen Bruchgefahr erhöhen würde. Von den Beschleunigungssensoren am FOUP ist insbesondere der Sensor auf der Lamelle, auf der auch der Wafer liegt und somit die Erregungsfunktion für den Wafer darstellt, relevant. Dieser Sensor ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2. Platziertes Beschleunigungssensor auf der Lamelle.

Für die experimentellen Schwingungsuntersuchungen wurde der FOUP zunächst hängend an der dafür vorgesehenen Halterung montiert, was den Betriebszustand darstellt. Für die Untersuchungen für schwingungsmindernde Maßnahmen sollte der FOUP in seiner Bewegung eingeschränkt werden, wodurch dieser direkt auf den Shaker montiert wurde. Die beiden beschriebenen Versuchsaufbauten sind in Abbildung 3 dargestellt.

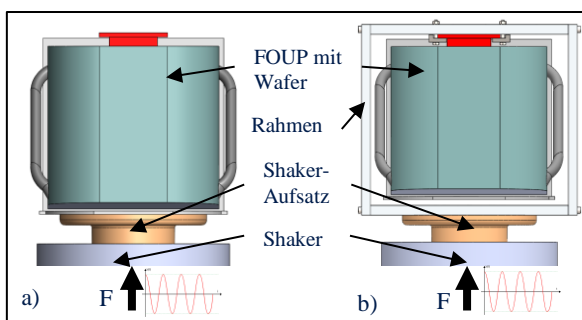


Abbildung 3. FOUP-Befestigungen auf den Shaker a) direkt b) hängend durch Rahmenbefestigung

Als Wafer stehen 2 verschiedene Typen zur Verfügung: ein unprozessierter und ein prozessierter Wafer, jeweils mit einem Durchmesser von 300 mm.

4 SCHWINGUNGSERGEBNISSE

Die Erregung erfolgte auf zwei verschiedene Arten. Zum einen der Impuls und zum anderen eine Sinus-Erregung. Beim Impuls wird mit einem einmaligen Kraftstoß der Gegenstand in Schwingung versetzt und anhand seines Ausschwingverhaltens die erste Eigenfrequenz sowie das Lehrsche Dämpfungsmaß ermittelt. Der Impuls berührt in einer sehr kurzen Ausschwingzeit viele Eigenfrequenzen, bei der oftmals nur die Eigenfrequenzen großer Amplituden sichtbar werden. Bei der Sinus-Erregung durchfährt der Shaker langsam ein vordefiniertes Frequenzband. Dabei werden auch kleine Eigenfrequenzen sichtbar. Die Eigenfrequenzen des Wafers sind zwar an jeder Stelle gleich. Sie unterscheiden sich aber in ihren Amplituden – je nachdem ob an einem Schwin-

gungsbau oder an einem Schwingungsknoten gemessen wird. Darum ist es notwendig, mehrmals und ggf. an verschiedenen Stellen zu messen, um auch Frequenzen zu ermitteln, die an anderen Stellen möglicherweise größere Amplituden aufweisen. Durch mehrere Bohrungen auf der FOUP-Oberseite gelangte der vom Laser-Vibrometer emittierte Laserstrahl senkrecht zur Oberfläche auf den Wafer. Die Bohrungen stellen die Messpositionen für die Versuche dar. Ein Bild der jeweiligen Messstellen auf der FOUP-Oberseite ist in Abbildung 4 zu sehen.

Die verschiedenen Messstellen zeigten in den Messverläufen der Sinus-erregten Versuche keine Unterschiede. In den Amplitudenspektren der Ausschwingversuche wurden Unterschiede in der Höhe der Amplituden beobachtet, die ermittelten Frequenzen blieben im Bereich von ± 1 Hz gleich, sodass nachfolgend exemplarisch auf die Messstelle 1 Bezug genommen wird.

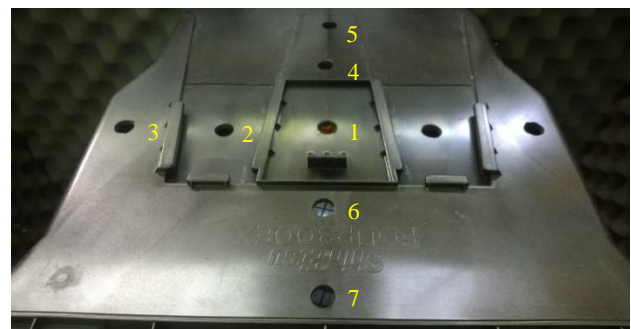


Abbildung 4. Messpositionen auf der FOUP-Oberseite für den Laserstrahl des Laser-Vibrometers zum Wafer

4.1 EIGENFREQUENZERMITTLUNG DES WAFERS IM GELAGERTEN FOUP

Die Eigenfrequenzermittlung des Wafers erfolgte im gelagerten FOUP, um seine Lagerung und sein Steifigkeitsverhalten real abzubilden. Dabei erfährt nur der Wafer eine manuelle Erregung mittels Impuls, wodurch der Schwingungseinfluss des FOUP eliminiert wird. Aus den resultierenden Ausschwingverläufen werden die Eigenfrequenzen sowie die Dämpfungsmaße ermittelt. Das Dämpfungsmaß ist neben den Werkstoffkennwerten ein wichtiger Parameter für das FE-Modell.

Die zwei analysierten Wafer-Typen zeigen unterschiedliche Schwingungsverläufe. Während der Versuch mit dem unprozessierten Wafer einen typischen Verlauf einer freien gedämpften Schwingung zeigt, siehe Abbildung 5, ist der Verlauf des prozessierten Wafers vollkommen unregelmäßig, siehe Abbildung 6.

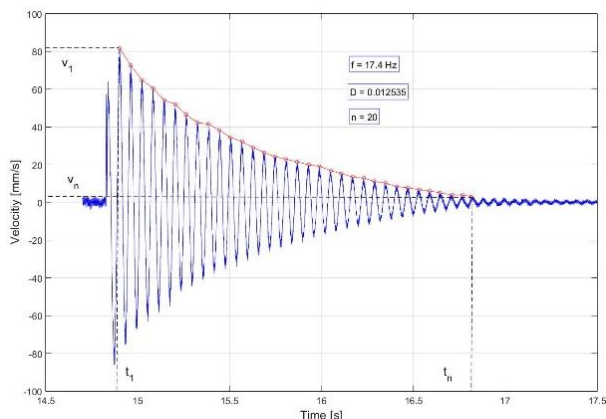


Abbildung 5. Ausschwingverlauf des unprozessierten Wafers

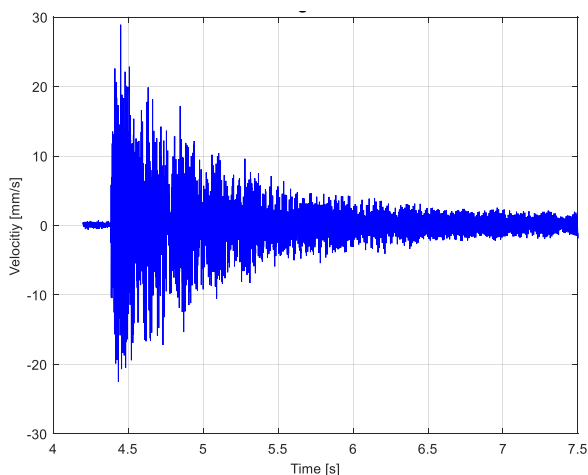


Abbildung 6. Ausschwingverlauf des prozessierten Wafers

Das aus den Ausschwingversuchen ermittelte Dämpfungsmaß ergibt im Durchschnitt beim unprozessierten Wafer den Wert von 0,0125, beim prozessierten Wafer den Wert von 0,0087. Mithilfe der Fourierreihen-Transformation ergeben sich weitere Eigenfrequenzen. Im Amplitudenspektrum zeigt der unprozessierte Wafer die größten Amplituden bei 16 Hz und 18 Hz, der prozessierte Wafer bei 22 Hz und bei 110 Hz. Die Amplitudenspektren beider Wafer sind für jeweils einen Ausschwingversuch exemplarisch in Abbildung 14 in Abschnitt 5 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass das Amplitudenspektrum des unprozessierten Wafers einen deutlichen Ausschlag für die Eigenfrequenz aufweist, anschließend stark abfällt und keine weiteren nennenswerten Peaks zeigt. Das Amplitudenspektrum des prozessierten Wafers zeigt neben den genannten kritischen Frequenzen noch weitere kleine Peaks. Diese kleinen Peaks könnten im Fall einer Schwingungsanregung dazu führen, dass der prozessierte Wafer sensibler auf diese Anregung durch erhöhte Amplituden reagiert.

4.2 EIGENFREQUENZBESTIMMUNG DES FOUP

Die Eigenfrequenzbestimmung des FOUP erfolgte durch das Shaker-System mit einer Sinus-erregten Beschleunigung von 2,5 m/s². Dabei wurde der FOUP ohne Wafer in der hängenden Versuchsanordnung, siehe Abbildung 3b, auf dem Shaker befestigt. Der Sensor auf der Lamelle erbrachte in diesem Verfahren kein sinnvolles Ergebnis, da das Shaker-System nahezu jede Frequenz als Eigenfrequenz betrachtete und somit unzählige Werte lieferte. Daher wurde für die Eigenfrequenzuntersuchung des FOUP der auf der FOUP-Oberseite platzierte Sensor gewählt. Das durch das Shaker-System ermittelte Amplitudenspektrum ist in Abbildung 7 dargestellt, bei dem die Benennungen „Controller“ die Erregung des Shakers und „Sensor FOUP“ die Schwingung des FOUP beschreiben.

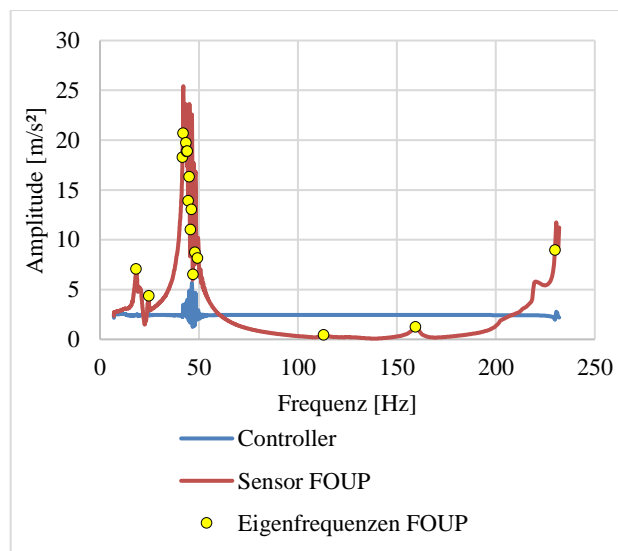


Abbildung 7. Amplitudenspektrum mit den Sensoren auf dem Shaker (Controller) und auf der FOUP-Oberseite (Sensor FOUP) der Eigenfrequenzermittlung durch das Shaker-System

Die unterste Eigenfrequenz liegt bei 18 Hz. Die meisten Eigenfrequenzen und zugleich diejenigen mit der größten Amplitude sind im Bereich von 41 Hz bis 50 Hz zu finden. In diesem Bereich steigt die Amplitude bis auf das 10-fache der Erregerbeschleunigung und der FOUP zeigt optisch starke Nick- und Drehbewegungen. Weitere Eigenfrequenzen sind bei 25 Hz, sowie 230 Hz zu finden. Die ermittelten Frequenzen von 113 Hz sowie 160 Hz werden vom Shaker-System als Eigenfrequenzen betrachtet, sind aber unkritisch, da ihre Amplitude geringer als die Erregeramplitude ist. Weitere Frequenzen konnten nicht bestimmt werden, da der Shaker nach der letzten gefundenen Eigenfrequenz abbrach. Durch den resonanten FOUP wurden die technischen Regelungsgrenzen des Shakers überschritten. Es ist anzunehmen, dass sich bei 230 Hz ein ähnlicher Frequenzbereich wie bei 41 Hz bis 50 Hz herausbildet. Mit dem externen Datenerfassungsprogramm wurde der Schwingungsverlauf mit dem Sen-

sor auf der Lamelle aufgezeichnet, dessen Daten zur weiteren Auswertung, z. B. Spektrogramme, zur Verfügung stehen. Spektrogramme sind in der Schwingungsanalyse von großer Bedeutung, da sie den Schwingungsverlauf dreidimensional darstellen. Zum einen spannen die Zeit und die Frequenz eine Ebene auf, zum anderen ist es die qualitative Darstellung der Amplituden, die durch entsprechende Verfärbungen in dieser Zeit-Frequenz-Ebene die dritte Dimension liefert.

Abbildung 8a zeigt den durch das externe Datenerfassungsprogramm aufgenommenen Beschleunigungsverlauf der Lamelle. Der eingezeichnete Frequenzverlauf ist die Erregerfrequenz. Sie wird aus den Messdaten eines direkt auf dem Shaker befestigten Beschleunigungssensors, dem Controller, berechnet. Im Spektrogramm aus Abbildung 8b spiegelt sich der Frequenzverlauf des Durchlaufes wider. Die kritischen Frequenzen, das sind die Frequenzen mit Amplituden oberhalb der Erregeramplitude, sind durch gelbe Verfärbungen gekennzeichnet, was die Frequenzen 18 Hz, 25 Hz, 41 Hz bis 50 Hz und 230 Hz betrifft. Die vom Shaker-System auf der FOUP-Oberseite ermittelten Frequenzen mit 113 Hz und 160 Hz zeigen im Spektrogramm keine Verfärbungen, da ihre Amplituden, nach Abbildung 6, unterhalb der Erregeramplituden liegen.

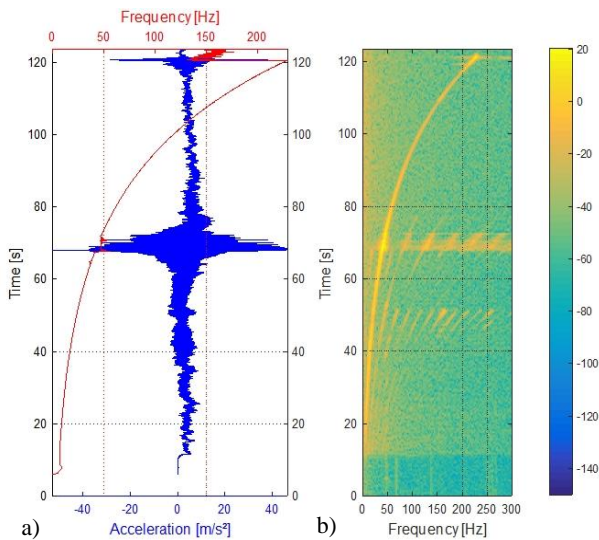


Abbildung 8. Messverlauf der Lamelle a) Beschleunigungs- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

4.3 UNTERSUCHUNGEN ZUM GEMEINSAMEN SCHWINGUNGSVERHALTEN VON FOUP UND WAFER

Für die Untersuchungen des Schwingungsverhaltens von FOUP und Wafer wurde der FOUP wiederum hängend auf dem Shaker befestigt und mit 2,5 m/s² im Sinus von 5 Hz bis 140 Hz erregt. Die Ergebnisse zeigen, dass

der nur wenige Gramm schwere Wafer einen Schwingungseinfluss auf die Sensoren am FOUP hat und das abhängig vom Wafer-Typ. Die Schwingungsbeeinflussung ist auf der Lamelle des Wafers am größten. Abbildung 9 stellt den Schwingungsverlauf der Lamelle mit unprozessierten Wafer dar, Abbildung 10 den mit prozessiertem Wafer. Im Vergleich zur Abbildung 8, welche den Schwingungsverlauf auf der Lamelle ohne Wafer darstellt, sind durch den Wafer-Einfluss neue Verfärbungen in diesen Spektrogrammen sichtbar geworden. Sie sind auf die Schwingungsbeeinflussung des Wafers zurückzuführen. Die Schwingungsbeeinflussung der jeweiligen Wafer-Typen ist dabei verschieden. Das Schwingungsverhalten des unprozessierten Wafers ist in Abbildung 11 zu sehen, die des prozessierten Wafers in Abbildung 12.

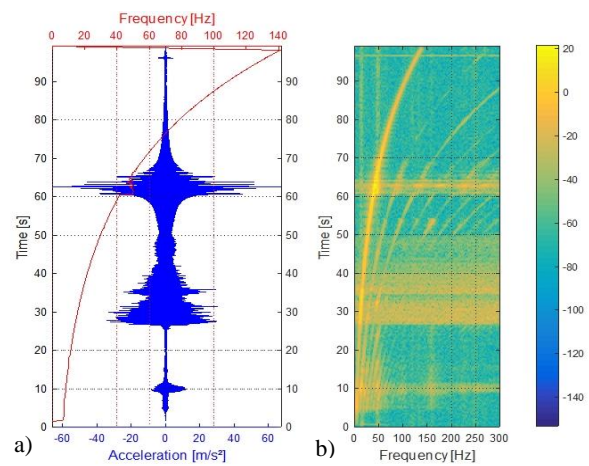


Abbildung 9. Ermittelter Messverlauf auf der Lamelle mit unprozessiertem Wafer a) Beschleunigungs- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

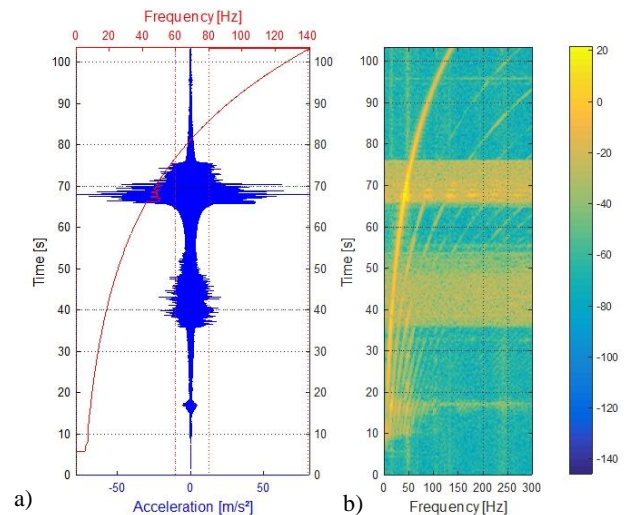


Abbildung 10. Ermittelter Messverlauf auf der Lamelle mit prozessiertem Wafer a) Beschleunigungs- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

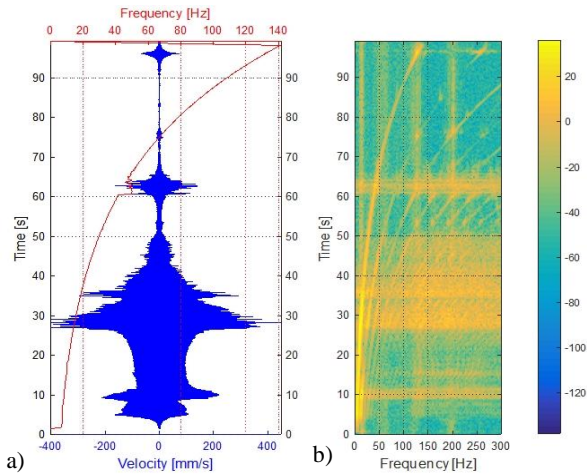


Abbildung 11. Ermittelter Messverlauf des unprozessierten Wafers a) Geschwindigkeits- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

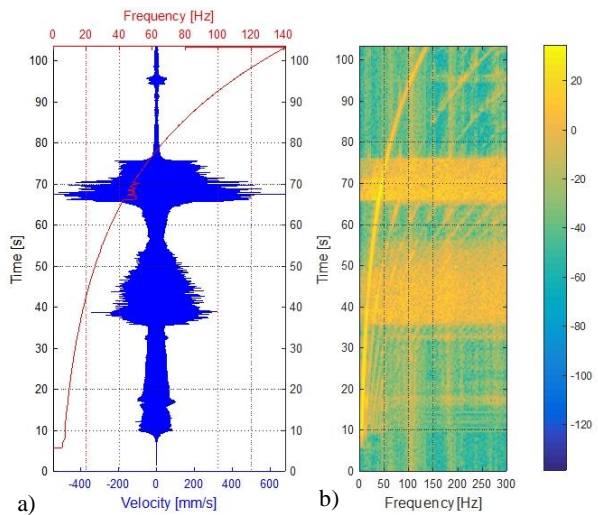


Abbildung 12. Ermittelter Messverlauf des prozessierten Wafers a) Geschwindigkeits- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

Aus den Abbildungen geht hervor, dass der unprozessierte Wafer in seinem kritischsten Frequenzbereich geringere Schwingungsamplituden als der prozessierte Wafer in seinem kritischsten Bereich aufweist. Dies ist auf die höhere Dämpfung des unprozessierten Wafers zurückzuführen, siehe Abschnitt 4.1. Das Schwingungsverhalten des unprozessierten Wafers zeigt im Bereich von 14 Hz bis ca. 18 Hz seine größten Amplituden, was im Bereich der ermittelten Eigenfrequenz aus den Ausschwingversuchen im Abschnitt 4.1 liegt. Der prozessierte Wafer besitzt einen sehr ähnlichen Schwingungsverlauf wie der der Lamelle und hat, wie die Lamelle auch, seine größten Amplituden im Frequenzbereich von 41 Hz bis 50 Hz. Daraus folgt, dass der prozessierte Wafer direkt auf Schwingungsanregungen der Lamelle reagiert. Das

bestätigt die Vermutung aus dem Abschnitt 4.1, dass die vielen kleinen Peaks aus der Fouriertransformierten auf die Empfindlichkeit des prozessierten Wafers schließen lassen.

Akustisch wurde der prozessierte Wafer subjektiv lauter und häufiger wahrgenommen, was die Aussage zur höheren Schwingempfindlichkeit des prozessierten Wafers stützt. Das Klappern lässt auf ein Abheben des Wafers von der Lamelle schließen.

Die Ergebnisse der Eigenfrequenzermittlung des FOUP mit Wafer sind in Tabelle 1 dargestellt, in der die kritischen Frequenzen der Wafer und der beeinflussten Lamelle abgebildet sind. Weiterhin ist das subjektiv akustische Klappern der Wafer den jeweiligen Frequenzen zugeordnet. Die fettgedruckten Markierungen weisen auf den kritischsten Bereich hin.

Tabelle 1. Ermittelte kritische Frequenzen aus den Schwingungsuntersuchungen von FOUP mit Wafer

Wafer = Schwingungsmessung der Wafer-Oberfläche durch den Laser

Lamelle = Beschleunigungsmessung auf der Lamelle des Wafers

akustisch = subjektiv wahrgenommenes Wafer-Klappern, bezogen auf die Frequenzanzeige des Shaker-Systems

FOUP mit unprozessiertem Wafer			FOUP mit prozessiertem Wafer		
Wafer [Hz]	Lamelle [Hz]	akustisch [Hz]	Wafer [Hz]	Lamelle [Hz]	akustisch [Hz]
7-9	7-8,5 (8)	14-19	8,5	8	16,5-24,5
14-17,5	13-24	19,5-23	15	16-26	25-31
18,2-29	25-29		16-30	41-50	40,5-50,5
41-50	41-50		41-50		
132	132		104-109		

5 ERGEBNISSE DER FEM-UNTERSUCHUNG

Die experimentellen Untersuchungen zeigen das Schwingungsverhalten an den jeweiligen Messpunkten. Die Darstellung der Schwingformen über den gesamten Wafer ist mit einem FE-Modell möglich. Grundlage für das Simulationsmodell ist der unprozessierte Wafer im ruhenden FOUP, der Schwingungseinfluss des FOUP bleibt unberücksichtigt. Dieser Versuchsaufbau entspricht den Ausschwingversuchen aus Abschnitt 4.1. Die Geometrie des Wafers wurde mit einem Linien-Laser vermessen und nachgestellt. Die Wafer liegen im FOUP nicht flächig auf den Lamellen auf, sondern auf separaten Lagerpunkten, die aus der Lamelle hervorragen, zu sehen in Abbildung 2. Seitlich wird der Wafer durch die Wandung des FOUP sowie des Deckels begrenzt. Diese Lagerpunkte des Wafers im FOUP wurden durch einen Modellab-

druck rekonstruiert, indem eine Scheibe mit dem Durchmesser des Wafers auf die farblich markierten Lagerpunkte sowie an die seitlichen Begrenzungen gedrückt wurde. Das so entstandene Negativ wurde vermessen und im FE-Modell nachgebildet. Um Rechenzeit zu sparen wurde nur der halbe Wafer modelliert, aber in Verbindung mit der Symmetriefunktion des Programms mit all seiner Geometrie sowie den gesetzten Randbedingungen komplett betrachtet. Zur Ermittlung der Eigenfrequenzen wurde eine Modalanalyse durchgeführt. Die aus den Ausschwingversuchen ermittelte Dämpfung wurde in die FE-Analyse einbezogen. Das Ergebnis der Modalanalyse zeigt Tabelle 2. Die Eigenfrequenzen lassen sich in der FEM-Simulation durch die Schwingungsmoden darstellen. Abbildung 13 zeigt die ersten drei Eigenschwingmoden des im FOUP gelagerten Wafers aus der FE-Modalanalyse.

Tabelle 2. *Ermittelte Eigenfrequenzen des unprozessierten Wafers aus der FE-Modalanalyse*

lfd. Nummer	Frequenz [Hz]
1	19,6
2	36,8
3	72,8
4	95,8
5	117,6
6	127,6
7	161,3
8	190,1
9	204,3

Die erste Eigenfrequenz der Modalanalyse mit 19,6 Hz ist nahe der ermittelten Eigenfrequenz aus den Ausschwingversuchen von 18 Hz. Um die Eigenfrequenz mit der größten Amplitude zu ermitteln, ist der Frequenzverlauf von Interesse. Dafür sind im FE-Modell die Messpositionen des Lasers auf dem Wafer aus Abbildung 4 mithilfe des Modellabdrucks nachgebildet worden. Die erhaltenen Amplitudenspektren wurden mit denen aus den experimentellen Versuchen der Ausschwingversuche verglichen. Ein Beispiel dieser Amplitudenspektren ist in Abbildung 14 dargestellt, die ebenfalls die experimentellen Verläufe aus den Ausschwingversuchen zeigt. Die Ergebnisse der FE-Modalanalyse stimmen für die erste Eigenfrequenz von 19,6 Hz näherungsweise überein. Im weiteren Verlauf weichen die Verläufe geringfügig ab, was zum einen am Umstand der Ausschwingversuche liegen kann, da diese vorrangig nur markante Eigenfrequenzen erfassen, und zum anderen an den theoretischen Berechnungen der FE-Simulation, die Parameter, z. B. die Lagerung, Werkstoff oder Steifigkeit des Wafers, idealisiert annimmt. Die Amplitudenspektren an den modellierten Messpositionen weisen ebenso geringfügige Unter-

schiede in den Amplituden auf, die kritischen Eigenfrequenzen bleiben dennoch gleich.

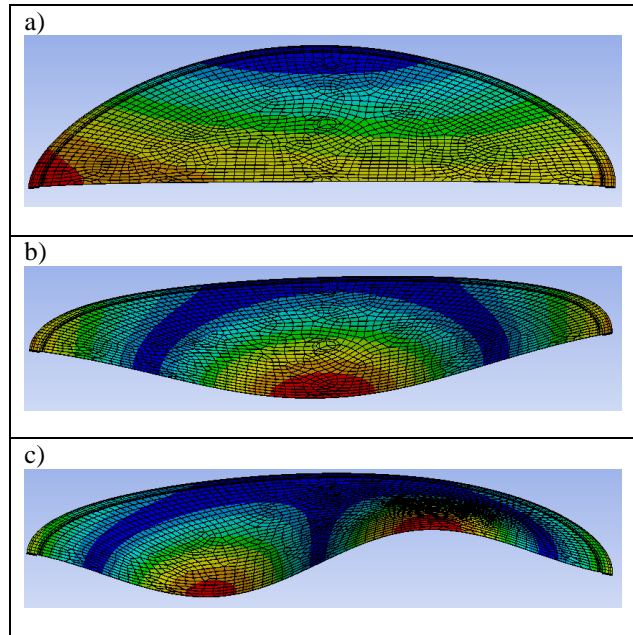


Abbildung 13. *Ersten drei Schwingungsmoden der FE-Modalanalyse mit a) 19,6 [Hz] b) 36,8 [Hz] c) 72,8 [Hz]*

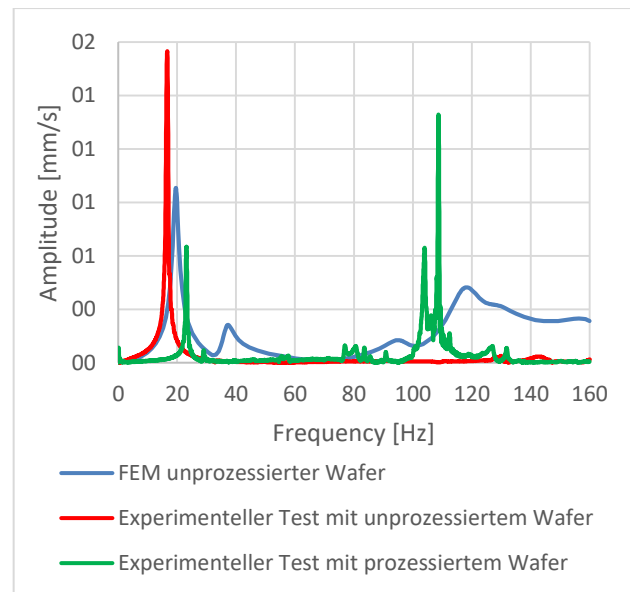


Abbildung 14. *Amplitudenspektren der Wafer an der Messstelle 1 aus der FE-Modalanalyse sowie im Vergleich zu den Wafers aus den Ausschwingversuchen*

6 ERGEBNISSE DER SCHWINGUNGSMINDERNDEN MAßNAHMEN

Zur Minderung der Schwingungsamplituden ist zunächst eine Modifizierung der Wafer-Lagerung am nahelegendsten, da sie die Erregerfunktion für den Wafer besitzt. Darum wurde experimentell die Lagerung des Wafers durch papp- oder schaumstoffähnliche Materialien modifiziert. Beide Modifizierungsarten bewirkten keine wesentliche Verringerung der Schwingungsamplituden. Lediglich das akustisch wahrnehmbare Klappern der Wafer konnte erheblich reduziert werden. Es scheint demnach eine Modifizierung der Lamelle nicht zielführend zu sein, sondern eine Minimierung der Bewegung des FOUP an der Halterung. Im kritischen Frequenzbereich weist der FOUP massive Nick- und Drehschwingungen auf, die zu starkem Klappern der Wafer, insbesondere des prozessierten Wafers, führte. Um die Bewegung des FOUP um seine Halterung zu eliminieren, wurde der FOUP direkt auf den Shaker montiert, wie es Abbildung 3a) zeigt. Das Ergebnis der direkten FOUP-Befestigung sind wesentlich geringere Schwingungsamplituden gegenüber der hängenden Befestigungsvariante, die beim unprozessierten Wafer um das 2,5-fache, beim prozessierten um das 3-fache kleiner sind. Ein exemplarischer Schwingungsverlauf mit unprozessiertem Wafer ist in Abbildung 15 dargestellt, die des prozessierten Wafers in Abbildung 16.

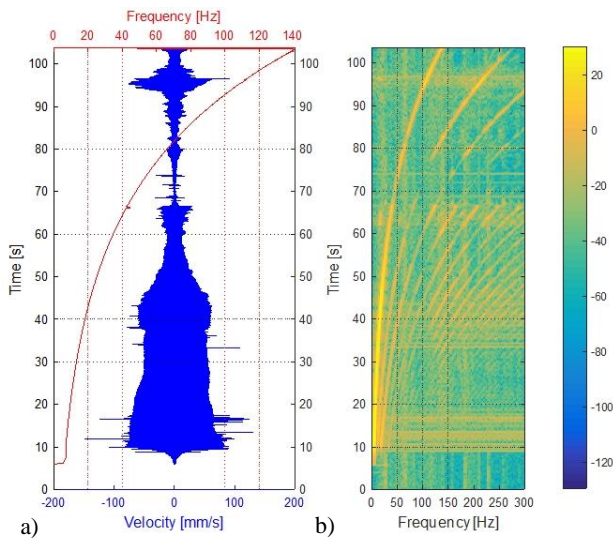


Abbildung 15. Messverlauf des unprozessierten Wafers mit direkter FOUP-Befestigung a) Geschwindigkeits- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

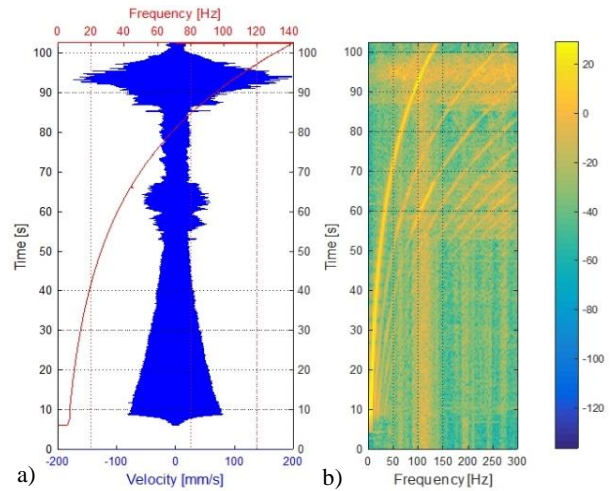


Abbildung 16. Messverlauf des prozessierten Wafers mit direkter FOUP-Befestigung a) Geschwindigkeits- und Frequenzverlauf b) Spektrogramm

Wird die direkte FOUP-Befestigung mit den Abbildungen der hängenden Versuchsanordnung aus den Abbildungen 11 und 12 miteinander verglichen, so ist ein deutlicher Unterschied im Verlauf der Schwingungsamplitude sowie der kritischen Frequenzen zu sehen. Der Frequenzbereich von 41 Hz bis 50 Hz zeigte sich in der direkten Befestigung für beide Wafer-Typen als unkritisch. Der unprozessierte Wafer weist seine größten Amplituden im Bereich von 7 Hz bis 9 Hz auf, der prozessierte Wafer verläuft wiederholt parallel zum Schwingungsverlauf der erregten Lamelle und zeigt bei 87 Hz bis 131 Hz seinen kritischsten Bereich, mit der höchsten Amplitude bei 108 Hz. Die ermittelten kritischen Frequenzen der direkten FOUP-Befestigung auf dem Shaker sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3. Ermittelte kritische Frequenzen aus den Schwingungstest mit der direkten FOUP-Befestigung

Wafer = Schwingungsmessung der Wafer-Oberfläche durch den Laser

Lamelle = Beschleunigungsmessung auf der Lamelle des Wafers

akustisch = subjektiv wahrgenommenes Wafer-Klappern, abgelesen an der Frequenzanzeige des Shakers

unprozessierter Wafer			prozessierter Wafer		
Wafer [Hz]	Lamelle [Hz]	akustisch [Hz]	Wafer [Hz]	Lamelle [Hz]	akustisch [Hz]
7-9	30-45	22,4	30-45	30-45	19,7-25,4
15	87-131	101-104	87-131	87-131	29,6-33,8
17-24		187			40,5-43,7
36-42					82-115,6
110-118					187-189

Die Ergebnisse zeigen, dass die direkte FOUP-Befestigung erheblich die Gefahr eines Wafer-Bruches im Resonanzfall durch verminderte Amplituden reduziert. Würde die Halterung und die FOUP-Oberseite so steif wie möglich gestaltet werden, würden Nick- und Drehschwingungen verringert oder gar eliminiert werden und ein ähnlicher Schwingungsverlauf wie bei der direkten Befestigung könnte sich einstellen. Bei der Versteifung sollte auf metallische Werkstoffe verzichtet werden, da Metalle eine wesentlich geringere Eigendämpfung als Polymere oder Verbundwerkstoffe aufweisen. Die Eigendämpfung des Werkstoffes trägt zur Amplitudenverringern bei. Es sollte daher ein Kunststoff höherer Festigkeit oder ein Faserverbundwerkstoff verwendet werden. Weiterhin können konstruktive Lösungen, z. B. das Einfügen von Versteifungsrippen, eine zielführende Alternative sein.

Eine FEM-Simulation eines vergleichbaren FOUP wurde durchgeführt, um die Bewegungen des FOUP an der Halterung zu verdeutlichen. Das Ergebnis zeigt in den ersten drei Schwingmoden starke Bewegungen am Übergang von der Halterung zum FOUP, was die Beobachtungen aus den Schwingungsuntersuchungen bestärkt, siehe Abbildung 17.

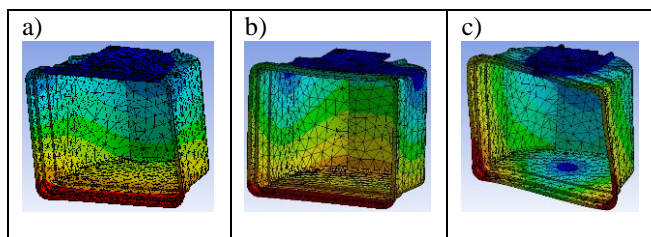


Abbildung 17. Schwingmoden des hängend befestigten FOUP aus der FE-Modalanalyse

- a) seitliche Biege-Nick-Schwingung um die Halterung bei 8,6 Hz
 b) frontale Biege-Nick-Schwingung um die Halterung bei 12 Hz
 c) Zug-Druck-Schwingung in der Diagonalen des FOUP bei 25 Hz

7 ZUSAMMENFASSUNG

Der prozessiererte Wafer weist mehr Peaks im Amplitudenspektrum der Ausschwingversuche auf, was auf eine höhere Empfindlichkeit schließen lässt. Seine kritischste Frequenz mit der größten Amplitude liegt bei 22 Hz. In den Schwingungsuntersuchungen mit dem FOUP wird diese Empfindlichkeit bestätigt, indem der Schwingungsverlauf des prozessierten Wafers parallel zu dem der Lamelle verläuft und dabei die kritischste Frequenz zwischen 41 Hz und 50 Hz aufweist. Der unprozessierte Wafer hat in den Amplitudenspektren der Ausschwingversuche seine Eigenfrequenzen zwischen 16 Hz und 18 Hz. Andere nennenswerte Peaks wurden in diesem Amplitudenspektrum nicht beobachtet. Auch in der Sinuserregung mit dem hängenden FOUP zeigt er in dieser Region seine Eigenfrequenz mit der größten Amplitude.

Die größere Empfindlichkeit des prozessierten Wafers zeigt sich durch ein subjektiv lauterer und häufigeres Klappern im Vergleich zu seinem unprozessierten Pendant.

Das FEM-Modell, das sich auf den unprozessierten Wafer im gelagerten und ruhenden FOUP bezieht, wurde mit den experimentell ermittelten Dämpfungswerten des unprozessierten Wafers validiert. Die Eigenfrequenz mit der größten Amplitude bei ca. 20 Hz entspricht in etwa der im Ausschwingversuch ermittelten Eigenfrequenz. Weiterhin sind die Amplitudenspektren der experimentellen Versuche sowie die der FEM-Simulation sehr ähnlich, sodass das Modell als gute Näherung beschrieben werden kann. Zu den Eigenfrequenzen sind auch die Schwingungsmoden ermittelt worden.

Die Reduzierung der Schwingungsamplituden durch schwingungsdämpfende Werkstoffe auf der Lamelle war nicht zielführend. Vielmehr wird eine Versteifung vom Übergang der Halterung auf die FOUP-Oberseite als Lösung vorgeschlagen, mit der die beobachteten Nick- und Drehbewegungen des FOUP verringert werden sollen. Um diese starken Bewegungen an der Halterung des hängenden FOUP auszuschließen, wurde der FOUP direkt auf den Shaker montiert. Das Ergebnis zeigt eine deutliche Verringerung der Schwingungsamplituden bis zu einem Faktor von 3. Zur Schwingungsminderung wird einerseits ein höherfestes Kunststoffmaterial oder ein Verbundwerkstoff vorgeschlagen, da diese Werkstoffe eine hohe Werkstoffdämpfung besitzen und Schwingbelastungen gut abfedern. Andererseits sind konstruktive Lösungen an der Halterung und der FOUP-Oberseite erforderlich.

8 LITERATUR

- [Mar98] Marsh, E. R.; Maher, B. J.; White, C. L.: *Modeling of silicon wafer vibration in smiconductor process tools*. In: Journal of sound and vibration (1998) 201(2), 231-241
- [Mit13] Mitterhofer, S.; Pühringer, J. D.; Schlosser, V.: An acoustic set up for the vibration analysis of silicon wafers. In IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013. Wien, Österreich
- [Pos09] Lee, Poshin (2009): *450mm FOUP/FOSB Development Status in Taiwan*. Presentation, Taiwan: Gudeng Precision Industrial Co.

- [She16] Sheng, Y.; Jiao, Z.; Hao, Y.; Luo, Y.; Deng, Y.: *Vibration Study on Surface Acoustic Wave for Particle Manipulation*. In 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2016 at Sofitel Xian on Renmin Square, Xian, China
- [Ste06] Steele, J.; Biswas, T.: *Development of a Shock & Vibration Spec for 300mm Wafer AMHS Handling*. In Proceedings of the 17th Annual SEMI/IEEE Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 2006. ASMC 2006, 245–250. Boston. doi:10.1109/ASMC.2006.1638762.
- [Sto13] Stoutenburg, J.; Howell, R. (2003): *300 mm One-Way Front Opening Shipping Box*. In Proceedings of the International Symposium on Semiconductor Manufacturing, 443–446. Hillsboro. doi:10.1109/ISSM.2003.1243322.
- [Wis11] Wisnu Aribowo; Takahito Yamashita: *Vibration Control of Semiconductor Wafer Transfer Robot by Building an Integrated Tool of Parameter Identification and Input Shaping*. Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011
- [Xia15] Xiaowen, Yu; Cong, Wang: *Controller Design and Optimal Tuning of a Wafer Handling Robot*. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015. Gothenburg, Sweden

Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: tobias.mueller@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Material Handling, Technische Universität Dresden

Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Material Handling in the Mechanical Engineering faculty since 2008. He holds a diploma degree in mechanical engineering from the TU Dortmund and a Master degree in industrial engineering from the Georgia Institute of Technology. He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His research areas are the design and optimization of facility logistics and production systems including a focus on the machinery and components involved. He currently works on energy efficient control strategies in material flow, fast approximation in early planning stages by means of standard design modules, online data analysis, formal verification of control logic, performance analysis of decentral and selfcontrolled systems, lightweight structures in material handling and stress analysis on wire ropes and toothed belts, respectively.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 32538
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Sebastian Rank, postdoctoral researcher at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Sebastian Rank is member of the scientific staff at the Chair of Material Handling. He received a M.S. degree in Economics and Engineering and a Ph.D. degree in Engineering at Technische Universität Dresden. His research interests include autocorrelation in logistics systems and AMHS simulation in semiconductor areas. He is member of ASIM.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 33289
Fax: +49 351 463 35499
E-Mail: sebastian.rank@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Tobias Müller, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Technische Universität Dresden.

Tobias Müller is research assistant at the chair of logistics engineering since 2010. Between 2005 and 2010 he studied mechanical engineering at the Universität Dresden. During the time as research assistant, he accompanied projects for industrial trucks, wire ropes and fatigue tests. His current research areas are the design of machinery components for material handling systems, improving the stage mast in industrial trucks and finite element analysis.

Address: Technische Universität Dresden, Faculty of Mechanical Science and Engineering, Institute of Material Handling and Industrial Engineering, Chair of Logistics Engineering, 01062 Dresden, Germany.
Phone: +49 351 463 33510

Dr. Germar Schneider, Manager at Infineon Technologies Dresden GmbH and in charge of “Thin Wafer Handling”.

Germar Schneider is project leader for automation projects within the Ecsel-JU funding project PowerBase. He received a Diploma and a PhD in analytical chemistry and has worked for more than 20 years in different positions at Infineon Technologies. In the recent years he filled management positions in processing, manufacturing, and maintenance departments.

Address: Infineon Technologies Dresden GmbH,
Königsbrücker Straße 180, 01099 Dresden,
Germany.

E-Mail: germar.schneider@infineon.com

FÖRDERHINWEIS

The project PowerBase has received funding from the Electronic Component Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) under grant agreement No 662133. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Austria, Belgium, Germany, Italy, Netherlands, Norway, Slovakia, Spain, United Kingdom.

This Project is co-funded by the Federal Ministry of Education and Research of Germany.

This project is co-funded by the Freistaat Sachsen in Germany.

