

Aktive Schwingungskompensation beim Ultraschall-Drahtbenden Verbesserung der Bondfähigkeit auf anspruchsvollen Oberflächen

Von Dr.-Ing. Michael Brökelmann, Hesse GmbH

Das Ultraschall-Drahtbenden ist ein seit vielen Jahren etabliertes Verfahren zur Kontaktierung der Elektroden von mikroelektronischen Komponenten und Leistungselektronikmodulen. Das Bonden auf anspruchsvollen Oberflächen, wie z. B. in Kunststoffrahmen eingebettete Steckeranschlüsse, stellt eine große Herausforderung dar. Ein neuer Ansatz zur Unterdrückung unerwünschter vertikaler Schwingungen durch aktive Schwingungskompensation kann die Bondfähigkeit verbessern.

Einleitung

Die Elektroden eines Leistungshalbleitermoduls werden in der Regel mit einem Aluminiumdraht mit den entsprechenden Elektroden eines Substrats verbunden. Der Draht wird hierbei durch ein Ultraschall-Reibschweißverfahren mit der Elektrodenoberfläche kontaktiert. Aufgrund der sehr hohen Anforderungen bezüglich der Qualität und Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindungen ist eine äußerst präzise Kontrolle des Prozesses erforderlich. Dies wird umso wichtiger, da die Geschwindigkeit moderner Bondmaschinen weiter zunimmt. Eine zusätzliche Herausforderung ist das Bonden auf anspruchsvollen Oberflächen, wie z. B. dünnen in Kunststoffrahmen eingebetteten Anschlusssteckern, oder andere weiche Untergründe wie überhängende gestapelte Halbleiter-Chips (stacked dies) oder dünne Anschlussrahmen (lead frames).

Ziel

Der Ultraschallschwinger ist ein wesentlicher Bestandteil eines Ultraschall-Drahtbonders. Er erzeugt den Strom für den Bondprozess in Form von mechanischen Schwingungen mit Frequenzen im Ultraschallbereich. Er wird in einer Longitudinal-Eigenmode betrieben, welche eine spezifische Eigenfrequenz (Resonanz) und Eigenschwingungsform besitzt. Diese ist aufgrund der asymmetrischen Befestigung des Schweißwerkzeugs i. d. R. nicht völlig symmetrisch, sodass auch Schwingungen orthogonal zur Hauptbondrichtung entstehen. Neben dieser Eigenmode gibt es weitere orthogonale Eigenmoden sowie Eigenmoden des Substrats oder des Bonduntergrundes. Im Zusammenwirken mit der nicht-linearen Prozessdynamik kann dies zu schwankenden Normalkräften im Reibungskontakt und einer Störung des Bondprozesses führen.

Ein weiterer Aspekt ist im Zusammenhang mit dem Kupferdraht-Bonden von Bedeutung, welches ständig an Bedeutung zunimmt. Da das Kupferdraht-Bonden stärkere Bondkräfte und Schwingungsamplituden erfordert als das Aluminiumdraht-Bonden, besteht eine erhöhte Gefahr der Beschädigung des Chips oder der darunter liegenden Schichten. Deshalb ist es angestrebt, vertikalen Schwingungen zu reduzieren und nach Möglichkeit vollkommen horizontale Ultraschallschwingungen zu erzeugen.

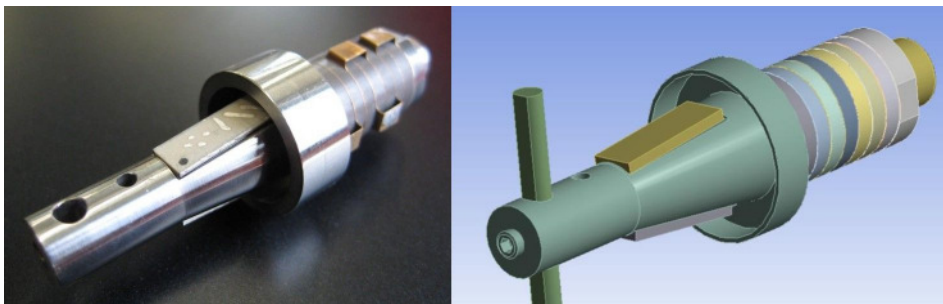


Abbildung 1: Ultraschallschwinger mit zusätzlich angebrachten IDE-Piezoaktoren

Ziel dieser Studie ist es, die Möglichkeit der Kompensation oder zumindest der deutlichen Reduzierung unerwünschter vertikaler Schwingungen während des Betriebs durch die Verwendung spezieller Aktoren in Verbindung mit einem geeigneten Verfahren zur Schwingungsreduzierung zu zeigen. Außerdem soll dieses Verfahren die Prozessvarianz verringern und die Stabilität und Zuverlässigkeit des Bondprozesses erhöhen.

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des Verbundprojektes HIPER-ACT (Novel technology for high-performance piezoelectric actuators) durchgeführt, das durch das Siebte Rahmenprogramm der Europäischen Gemeinschaft gefördert wurde (FP7/2007-2013, Fördervertrag Nr. 212394, www.hiperact.org). Innerhalb dieses Projekts wurde eine neue Technologie zur Herstellung von Piezoaktoren (InterDigitated Electrode Technology – IDE) entwickelt. Diese Piezoaktoren wurden im Technologiedemonstrator zur Schwingungsreduzierung beim Ultraschall-Drahtbonds eingesetzt (siehe Abb. 1).

Lösungsansatz

Ein neuer Prototyp-Ultraschallschwinger wurde entwickelt, der in der Lage ist vertikale Schwingungen mithilfe zusätzlicher piezoelektrischer Aktoren zu kompensieren. Diese zusätzlichen Aktoren dürfen allerdings die Längsschwingungen des Ultraschallschwingers nicht beeinflussen, sondern nur die hierzu orthogonalen Schwingungen. Dies wird durch eine spezielle Konfiguration der zusätzlichen Aktoren erreicht. Dafür wird einer der Aktoren auf der Ober- und ein zweiter auf der Unterseite des Ultraschallschwingers angebracht. Die Polarisierung der Aktoren wird wie in Abbildung 2 dargestellt gewählt. Bei freien Längsschwingungen heben sich die elektrischen Ladungen an den Elektroden des oberen und unteren Aktors gegenseitig auf (Abb. 2 links: $V_1 + V_2 = 0$). Bei Biegeschwingungen wird eine Piezokeramik 'gestreckt' während die andere 'gestaucht' wird. Aufgrund der entgegengesetzten Polarisierung der beiden Aktoren kann in diesem Fall die volle piezoelektrische Wirkung genutzt werden (Abb. 2 rechts: $V_1 = V_2$). Das Anlegen einer elektrischen Steuerspannung erzeugt daher eine reine Biegung und damit vertikale Bewegungen des Schwingkörpers, ohne jedoch die Hauptlängsschwingung zu beeinträchtigen. Somit wird eine optimale Kopplung mit der orthogonalen Biegemode erreicht bei gleichzeitig neutralem Verhalten bezüglich der Längsmode.

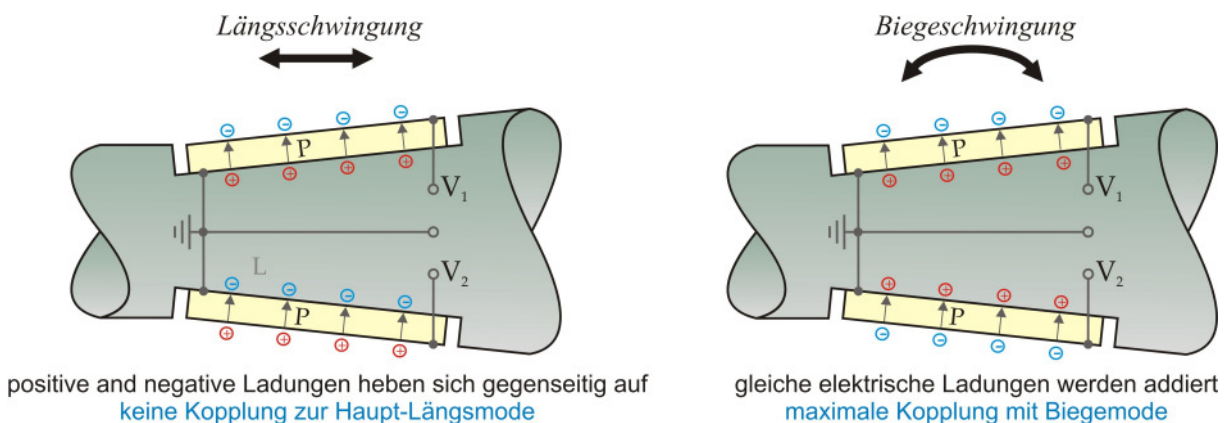


Abbildung 2: Prinzipielle Wirkungsweise der Schwingungskompensation

Aktive und passive Schwingungskompensation

Im ersten Teil dieses Projekts wurde der Nachweis der Machbarkeit mittels eines Prototyp-Ultraschallschwingers erbracht. Dies beinhaltet die Erprobung unterschiedlicher Techniken zur Schwingungskompensation, eine passive und eine aktive. Für die Erprobung und die Parametrierung dieser Techniken ist ein geeignetes Modell erforderlich. Deshalb wurde ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) des Ultraschallschwingers erzeugt, das zur Berechnung des dynamischen Schwingungsverhaltens verwendet werden kann. Das FE-Modell wurde durch Frequenzgangmessungen validiert. Zusätzlich wurde eine modale Reduktion bzgl. der zwei wichtigsten Eigenformen des FE-

Modells durchgeführt. Das System wird dann durch ein Modell mit zwei Freiheitsgraden (2-DOF-Modell) beschrieben, das die Längs- und Biegeschwingungen beschreiben kann. Mit diesem Modell können die optimalen Parameter der aktiven und passiven Schwingungskompensation berechnet werden. Diese Untersuchungen und die Modellgleichungen sind in [1] und [2] genauer beschrieben.

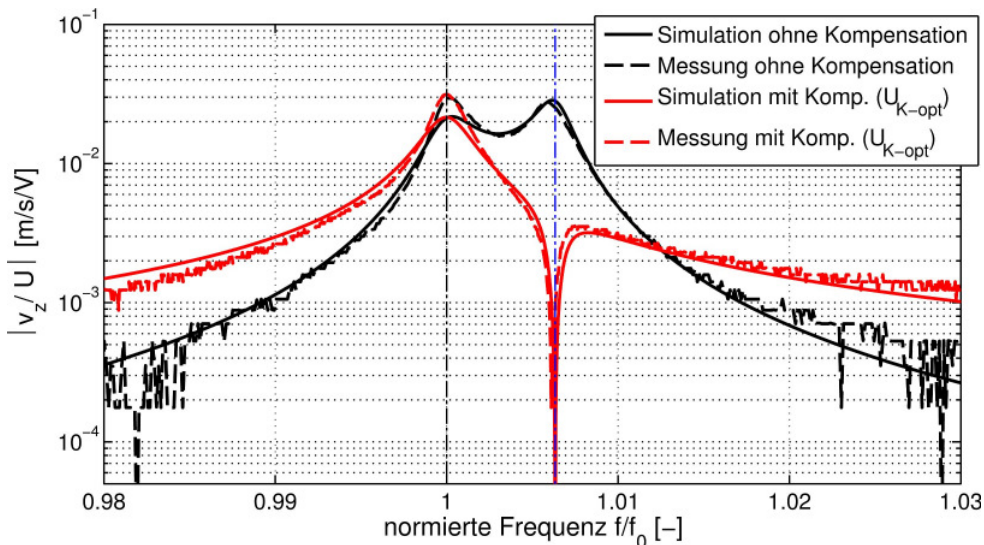


Abbildung 3: Aktive Schwingungskompensation freier vertikaler Schwingungen der Werkzeugspitze.

Für die aktive Schwingungskompensation werden die optimale Spannungsamplitude und die Phasenverschiebung in Bezug auf die Haupt-Ultraschallaktoren mithilfe des 2-DOF-Modells berechnet. Mit diesen Parametern können die vertikalen Schwingungen der Werkzeugspitze vollständig kompensiert werden. Dies wurde in einem Experiment für den freien, stationären Schwingungszustand nachgewiesen. Abbildung 3 zeigt die mittels Laser-Doppler-Vibrometrie gemessenen Frequenzgänge für die vertikalen Schwingungen der Werkzeugspitze. In diesem Beispiel existiert neben der Hauptmode noch eine parasitäre Mode. Die optimale Kontrollspannung für diese Nebenmode (normierte Frequenz bei 1,006) wurden berechnet und das Systemverhalten wurde erneut gemessen. Die Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Charakteristika sind sehr gut. Die prognostizierte „vollständige“ Kompensation wurde mit einer maximalen Reduktion der vertikalen Schwingungen von mehr als zwei Dekaden bestätigt (siehe Abb. 3).

Für die passive Schwingungskompensation wurde sowohl in der Simulation als auch beim Prototypen ein LRC-Schwingkreis (Induktivität, ohmscher Widerstand und Kapazität) aufgebaut und abgestimmt. Hierbei wird ein LR-Netzwerk bestehend aus einer Spule und einem Widerstand zwischen die Elektroden der zusätzlichen Piezoaktoren geschaltet. Zusammen mit der Kapazität der Piezokeramiken entsteht so ein Parallelschwingkreis, der auf die Arbeitsfrequenz abgestimmt wird und nach dem Prinzip eines Sperrkreises arbeitet. Die passive Dämpfungstechnik erfordert keine externe Energiequelle und ist inhärent stabil. Für den normalen Betrieb müssen die Netzwerkparameter präzise eingestellt werden. Die Messungen der freien Schwingungen und des Frequenzgangs zeigen eine stark dämpfende Wirkung und eine Reduzierung der vertikalen Schwingungen um einen Faktor von mehr als zehn. Eine vollständige Schwingungskompensation ist mit dieser Technik allerdings nicht möglich.

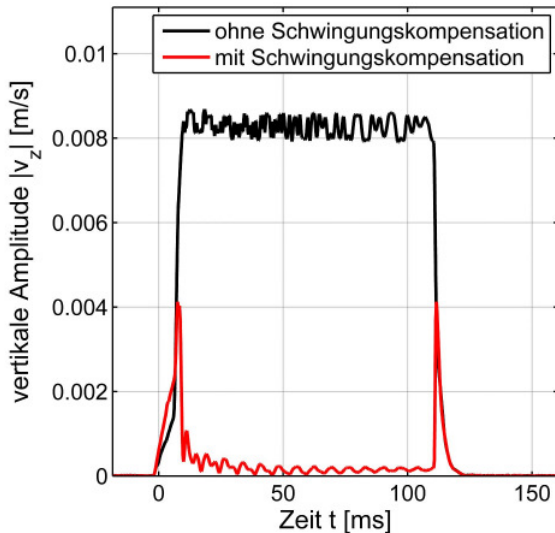


Abbildung 4: Aktive Schwingungskompensation mit Reibkontakt des Werkzeugs

Um die aktive Schwingungskompensation zu testen, wurden erste Experimente ohne Draht durchgeführt. In diesem Fall liegt, anders als beim Bondprozess mit Draht, ein gleichbleibender Reibkontakt an der Werkzeugspitze vor. Abbildung 4 zeigt, dass die in diesem Fall die Grundschiwingung nahezu vollständig reduziert werden kann. Die Untersuchungen zeigten allerdings auch, dass aufgrund der nicht-linearen Reibungseigenschaften Oberschwingungen von relativ geringer Amplitude erhalten bleiben.

Bondversuche

Um Bondversuche unter realistischen Bedingungen durchführen zu können, wurde eine Bondmaschine mit einem Zweikanal-Ultraschallsystem mit zwei Endstufen sowie einer speziellen Software zur Kontrolle beider Kanäle ausgestattet. Es konnte nachgewiesen werden, dass beide vorgeschlagenen Techniken zur passiven bzw. aktive Schwingungskompensation in der Lage sind, das Schwingungsverhalten während des Bondens deutlich zu verbessern und dies insbesondere unter schwierigen Bedingungen, wie z. B. auf schlecht fixierten Oberflächen.

Abbildung 5 zeigt einen Testaufbau, bei dem beabsichtigt eine Aluminiumplatte überhängend angebracht wurde, um den Bondprozess besonders anfällig für vertikale Schwingungen zu machen.

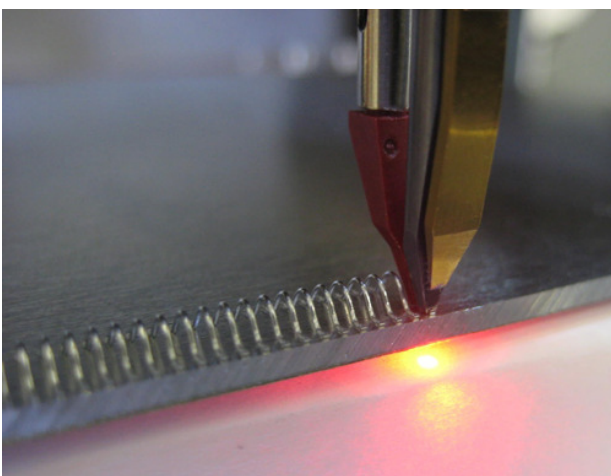


Abbildung 5: Messen von vertikalen Schwingungen direkt unterhalb der Bondstelle mittels Laser-Vibrometrie

Die passive Schwingungskompensation mit abgestimmtem LR-Netzwerk zeigt eine deutliche Dämpfungswirkung und reduziert die vertikalen Amplituden um ca. 50%. Die Frequenzbandbreite ist jedoch relativ schmal. Daher muss der optimale Wert für die Induktivität sehr genau eingehalten werden. Hierbei müssen auch mögliche Frequenzänderungen während des Betriebs aufgrund von Temperatur- und Leistungsabhängigkeit der Systemparameter berücksichtigt werden. Die Vorteile der passiven Schwingungskompensation mittels LR-Netzwerk sind deren einfache Umsetzung und inhärente Stabilität. Es ist keine zusätzliche Hard- oder Software erforderlich. Allerdings schränken die geringere Dämpfungsleistung und die Empfindlichkeit in Bezug auf Parameterabweichungen die Anwendung ein.

Der große Vorteil der aktiven Schwingungskompensation ist die Fähigkeit die orthogonalen Schwingungen bei jeder gewünschten Betriebsfrequenz nahezu vollständig zu kompensieren. Dazu sind jedoch ein wesentlich größerer Steuerungsaufwand und die Bereitstellung sehr hoher elektrischer Spannungen für die zusätzlichen Aktoren erforderlich. Es wurde festgestellt, dass die optimalen Parameter aufgrund des nichtlinearen zeitveränderlichen Bondprozesses nicht konstant sind, sondern vielmehr prozessabhängig und zeitveränderlich sind. Wie in Abb. 6 dargestellt, muss insbesondere der Phasenwinkel der Kontrollspannung angepasst werden, um während des gesamten Bondprozesses die volle Kompensationswirkung zu erzielen. Ein vertikaler Schwingungssensor, der ggf. in die Aktoren integriert werden könnte, sollte den Aufbau eines geschlossenen Regelkreises zur vollständigen Kompensation der vertikalen Schwingungen während des gesamten Bondprozesses ermöglichen.

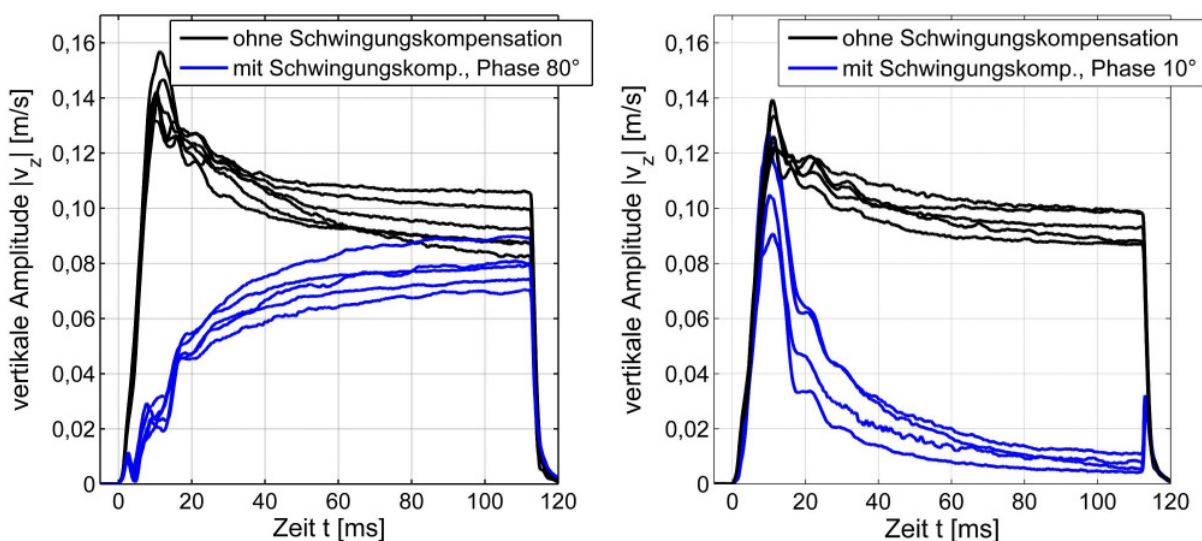


Abbildung 6: Bond-Tests des Verfahrens der aktiven Schwingungskompensation, Kompensation der vertikalen Werkzeugschwingungen zu Schweißbeginn (opt. Phase 80°, links) und bei Schweißende (opt. Phase 10°, rechts)

Eine weiterer positiver Effekt der bei den durchgeführten Untersuchungen zur Schwingungskompensation beobachtet wurde, ist die Reduktion der Standardabweichungen der gemessenen Prozesssignale. Mit der aktiven Schwingungskompensation scheinen die natürlichen Prozessschwankungen geringer zu sein. Dies muss durch weitere Studien und Tests bestätigt werden.

Schlussfolgerungen

Die passive Schwingungskompensation kann mit geringem Aufwand in eine Serienmaschine eingebaut werden, was zu einer Reduzierung der vertikalen Schwingungen um ca. 50% führen kann. Mit einer aktiven Schwingungskompensation ist eine fast vollständige Kompensation der vertikalen Schwingung möglich. Dazu muss jedoch ein weiterer Sensor in das System integriert und ein geschlossener Regelkreis aufgebaut werden. Für Anwendungen mit anspruchsvollen Bondflächen und

sehr hohen Anforderungen könnte dieser zusätzliche Aufwand angemessen sein und ein solches System könnte in zukünftige Bondmaschinen integriert werden.

Literaturangaben

- [1] Brökelmann, M.; Neubauer, M.; Schwarzendahl, S. M.; Hesse, H.-J., Wallaschek, J., “Active and Passive Vibration Control of Ultrasonic Bonding Transducers”, Proceedings of ACTUATOR 2012, 13th International Conference on New Actuators, Bremen, Deutschland, 18.-20. Juni 2012.
- [2] Neubauer, M.; Brökelmann, M.; Schwarzendahl, S. M.; Hesse, H.-J., Wallaschek, J., “Optimization of bond transducer vibrations using active and semi-active control”, Proceedings of SPIE Vol. 8341, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2012.