

Im Nachgang der IMAPS-Herbstkonferenz hatten wir vereinbart, ausgewählte Themen hier in unserem Verbandsteil für alle Mitglieder und Leser der PLUS zu teilen. In diesem Zusammenhang wurden die folgenden beiden Beiträge eingereicht, die wir gern vorstellen. Vielen Dank den Autoren für die Veröffentlichung und Anpassung an das Zeitschriftenformat.

Ultraschall-Drahtbondprozess: Effiziente Prozessentwicklung durch Simulation

Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik der Universität Paderborn, Reinhard Schemmel, Tobias Hemsel, Walter Sestro

In neuen Generationen von Leistungsmodulen mit SiC-Halbleitern – z. B. als Inverter für Antriebe und Converter in Batteriesystemen von Elektrofahrzeugen - werden zunehmend Kupfer- statt der etablierten Aluminium-Bonddrähte eingesetzt, um die Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu verbessern. Die höhere mechanische Festigkeit von Kupfer führt allerdings zu höheren Prozesskräften, wodurch das Risiko von Schädigungen der empfindlichen Chipoberseite steigt. Diese Herausforderungen gilt es während der Prozessentwicklung zu bewältigen, welche typischerweise in die drei Schritte *Prozess Design*, *Prozess Charakterisierung* und *Prozess Optimierung* gegliedert ist. Im *Prozess Design* wird zielorientiert der neue Bondprozess entworfen und z. B. das Die Top System, Drahtmaterial und Bondtool festgelegt; für das Kupfer-Dickdrahtbonden werden beispielsweise gezielt Die Top Systeme mit Kupfermetallisierung und Bondtools mit erhöhter Verschleißfestigkeit ausgewählt. In der *Prozess Charakterisierung* wird experimentell die Bondqualität in Abhängigkeit der Prozessparameter (US-Leistung, Bonddauer, Bondnormalkraft, ...) ermittelt. In der *Prozess Optimierung* erfolgt anschließend die Analyse mit z. B. Wechselwirkungs- und Haupteffekt-Diagrammen, um optimale Prozessparameter hinsichtlich der im Prozess Design festgelegten Ziele abzuleiten. Werden die Ziele nicht erreicht, sind Iterationen des Entwicklungsprozesses notwendig.

Die erfolgreiche und effiziente Entwicklung neuer Drahtbondprozesse nach dem klassischen Entwicklungsschema erfordert qualifiziertes Know How der Prozessentwickler, welche die Design-Parameter im ersten Schritt auswählen und Versuchspläne für die experimentelle Charakterisierung festlegen. Die experimentelle *Prozess Charakterisierung* ist ein wesentlicher Zeit- und Kosten-Faktor. Die Bondqualität wird durch Schertests, Mikroskop-Aufnahmen, Schliffbilder und aufwändige Lebensdauertests wie Active Power Cycling ermittelt, wobei die Tests manuell und nur teilweise automatisiert durchgeführt werden.

Um den Versuchsumfang so gering wie möglich zu halten und in verkürzter Zeit neue Bondprozesse entwickeln zu können, wurde am Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik der Universität Paderborn ein Prozessmodell für das Ultraschall-Dickdrahtbonden entwickelt. Die Einbettung des Modells in den Entwicklungsprozess zeigt Bild 1. Das Modell basiert auf einer Co-Simulation zwischen den beiden Programmen MATLAB und ANSYS, siehe Bild 2. In MATLAB wird mit recheneffizienten Modellen die transiente Dynamik des Prozesses mit den Schwingungen des Bondtools, Drahtes und Substrates sowie der Anbindungsverlauf in der Fügezone zwischen Draht und Substrat für jeden Schwingungszyklus über die gesamte Bonddauer berechnet. In ANSYS wird mit der Finite Elemente (FE) Methode die komplexe 3D-Drahtdeformation simuliert, welche neben der Bondnormalkraft auch von dem sogenannten *Ultrasonic Softening Effekt* beeinflusst wird. Aus der FE-Berechnung resultieren u. a. Kontaktfläche und Andruckverteilung zwischen Draht und Substrat, welche in das Anbindungsmodell einfließen. Das Prozessmodell gibt Scherkräfte, Scherfestigkeiten und weitere Größen wie Tangentialkraft- und Schwingungs-Verläufe aus. Die Berechnung erfolgt parallelisiert auf universitätseigenen Cluster-Rechnerressourcen (<https://pc2.uni-paderborn.de>), sodass umfangreiche Parameterstudien in deutlich kürzerer Zeit als experimentelle Studien mit gleichem Umfang durchgeführt werden können.

Das Simulationsmodell ermöglicht, bereits im ersten Prozessentwicklungsschritt modellbasiert eine Vorauswahl von verschiedenen Bondtooldesigns oder Substrat-Aufspannungen zu bewerten und Parameterräume für nachfolgende Bondtests festzulegen. Während der *Prozess Charakterisierung* liefert das Prozessmodell in Form von Simulationsergebnissen (Kraftreaktionen, Schwingungsverläufe, ...) wertvolle zusätzliche Informationen über den Bondprozess die experimentell nur eingeschränkt und mit sehr hohem Versuchsaufwand bestimmt werden könnten.

Als Beispiel dessen, was das Modell liefert, sind in Bild 3 Haupteffekt-Diagramme aus Simulation und Messung vergleichend dargestellt. Bei Aluminiumdraht steigt die Scherkraft im betrachteten Bereich mit zunehmender Bondnormalkraft, Bonddauer und Ultraschallspannung an. Wesentliche Einflussgröße ist die Normalkraft. Bei Kupferdraht hingegen zeigt die Bondnormalkraft keine signifikante Auswirkung auf die Scherkraftwerte. Bonddauer und Ultraschallspannung bewirken einen Anstieg der Scherkraft; die Ultraschallspannung zeigt hier den größten Einfluss.

Die gute Übereinstimmung von simulativ und experimentell ermittelten Haupteffekt-Diagrammen zeigt das Potential des Prozessmodells auf, welches bereits in der frühen Entwicklungsphase zur Bestimmung von signifikanten Einflussgrößen auf die Bondqualität eingesetzt werden kann.

Weitere Informationen zur Anwendung von Simulationsmodellen beim Ultraschall-Drahtbonden und -Schweißen finden Sie auf: <https://mb.uni-paderborn.de/ldm/forschung/sensorik-aktorik-und-ultraschalltechnik>.

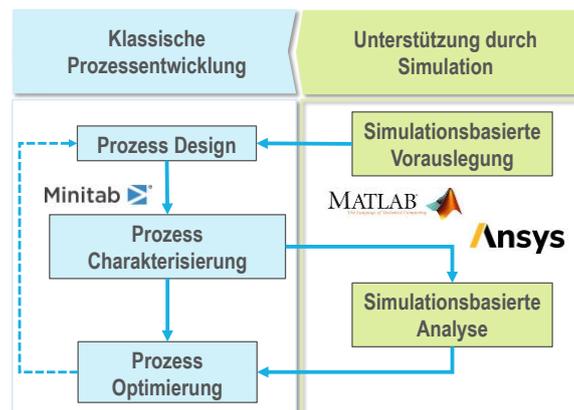


Bild 1: Einbettung des Prozessmodells für das Ultraschall-Dickdrahtbonden in die Prozessentwicklung

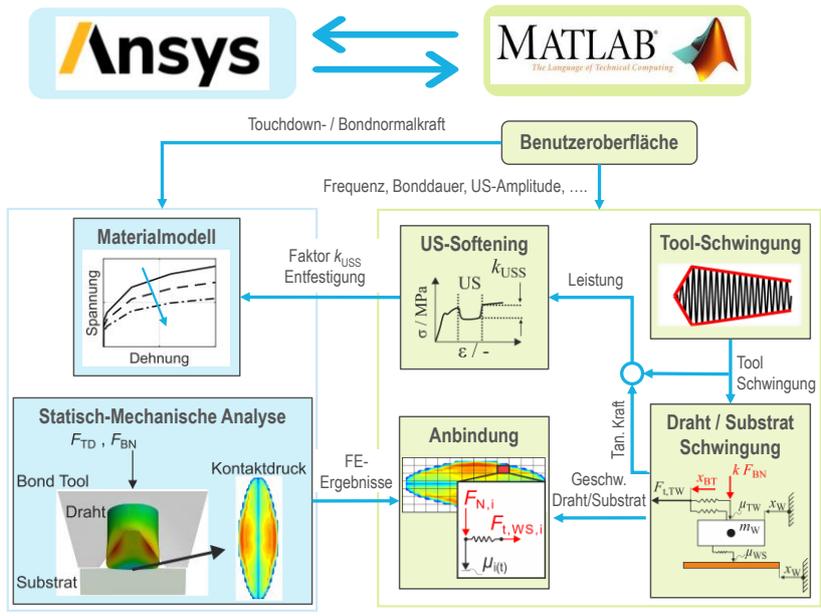


Bild 2: Struktur der Co-Simulation des Prozessmodells: Durch den modularen Aufbau kann das Modell mit begrenztem Aufwand für verschiedene Prozesse adaptiert und parametrisiert werden.

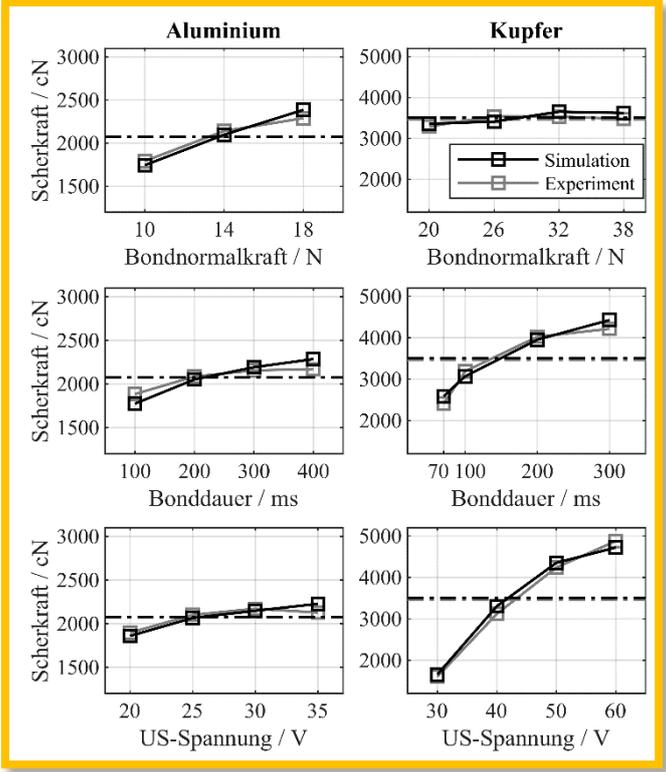


Bild 3: Simulativ und experimentell ermittelte Haupteffekt-Diagramme für das einphasige Ultraschall-Bonden von 400 µm-Draht auf DCB-Substrat: Die Signifikanz der Parameter ist materialabhängig und kann bereits in frühen Prozessentwicklungsphasen modellbasiert bewertet werden.