

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro

Prozessgerechte Gestaltung von Werkzeugen auf Basis von Verschleißsimulationen am Beispiel des Ultraschallbondens

Paul Eichwald



**Prozessgerechte Gestaltung von Werkzeugen auf Basis von
Verschleißsimulationen am Beispiel des Ultraschallbondens**

Zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Paul Eichwald, M.Sc.
aus Jurga

Tag des Kolloquiums:	09. Oktober 2020
Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro
Zweitgutachter	Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer

Schriften des Lehrstuhls für Dynamik und Mechatronik

Band 11

Paul Eichwald

**Prozessgerechte Gestaltung von Werkzeugen
auf Basis von Verschleißsimulationen
am Beispiel des Ultraschallbondens**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7812-1

ISSN 2566-8420

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort des Herausgebers

Neue technische Entwicklungen entstehen heute immer öfter an den Grenzen zwischen den Disziplinen, wo verschiedene Denkweisen sich begegnen und miteinander wechselwirken. Die Entwicklung neuer mechatronischer oder intelligenter technischer Systeme setzt ein interdisziplinäres Denken und Handeln voraus.

Mechatronische Systeme bestehen aus einer mechanischen Grundstruktur, die durch Integration von Sensoren und Aktoren sowie durch informationsverarbeitende Komponenten ein hohes Maß an Flexibilität und Leistungsfähigkeit gewinnt. Die Mechatronik stellt somit eine interdisziplinäre Kombination der Fächer Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik dar.

Der Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik gehört der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn an. In Forschung und Lehre befassen wir uns mit der Modellierung, Simulation, Zuverlässigkeit, Optimierung, Betrieb, Überwachung, Diagnose und Prognose von mechanischen, mechatronischen und intelligenten technischen Systemen. Die Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Nichtlineare Dynamik, Kontaktmechanik, Reibung, Condition Monitoring, Data Analytics, Reliability Engineering, Sensorik, Aktorik und Ultraschalltechnik. Sie spiegeln sich in den Bänden dieser Schriftenreihe, in denen Ergebnisse unserer Forschung veröffentlicht werden. Die Schriftenreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen der Universität und der praktischen Anwendung zu verbessern.

Das Ziel der Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Paul Eichwald war die Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur prozessgerechten Gestaltung von Werkzeugen auf Basis von Verschleißsimulationen unter Berücksichtigung der Produktqualität. Das von ihm entwickelte Simulationsverfahren konnte er erfolgreich zur Optimierung der Werkzeuggeometrie am Beispiel des Ultraschallbondens anwenden. Herr Eichwald liefert mit der vorliegenden Dissertation einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Optimierung von Werkzeuggeometrien.

Paderborn, den 8. Dezember 2020

Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Lehrstuhl für Dynamik und Mechatronik* an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn.

Mein Dank gilt zunächst Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro, meinem Doktorvater und Lehrstuhlinhaber, für die Betreuung dieser Arbeit und die konstruktive Ideengebung, die mir einen kritischen Zugang zu dieser Thematik eröffnete. Ich habe unsere Dialoge stets als Ermutigung und Motivation empfunden.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer für die hilfsbereite und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Mein Dank gebührt Dr.-Ing. Tobias Hemsel, Dr.-Ing. Michael Brökelman und Dr.-Ing. Matthias Hunstig. Sie fanden immer Zeit sich meinen wissenschaftlichen und technischen Fragen zu stellen und trugen auf diese Weise wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Für die begeisterte Zusammenarbeit im Labor und in der Werkstatt möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Martin Liekenbröcker und Dipl.-Ing.(FH) Eduard Kubi bedanken.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Andreas Unger und M.Sc. Collin Dymel, die mich fachlich und moralisch unterstützt haben.

Mein Dank gilt darüber hinaus dem Kollegium des Lehrstuhls für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hierbei danke ich insbesondere Dr.-Ing. Sergej Kohl, M.Sc. Sebastian Schulze und M.Sc. Florian Eacock sowie Marina Kassühlke, der „guten Seele“ des Lehrstuhls.

Danken möchte ich auch allen studentischen Hilfskräften, Praktikanten und Bachelor- sowie Masteranden für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung von numerischen Analysen und experimentellen Untersuchungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, Galina und Anatoli, sowie meinem Bruder, Juri. Sie ermöglichten mir meinen bisherigen Lebensweg. Danken möchte ich auch den Eltern meiner Frau, Olga und Waldemar.

Tief verbunden und dankbar bin ich meiner Frau, Elvira, und meinen Kindern, Aurelia und Maximilian, für ihre Unterstützung und das große Verständnis während der Fertigstellung dieser Dissertation.

Ihnen widme ich diese Arbeit.

Paderborn, den 12. Dezember 2020

Paul Eichwald

Kurzfassung

Das Ultraschalldrahtbonds ist seit Jahrzehnten eine etablierte Füge-technologie in der Aufbau- und Verbindungstechnik. Hierbei wird die Bondverbindung durch Reibschweißen mittels Ultraschallschwingungen des Bondwerkzeugs hergestellt, das als Bindeglied zwischen Bondmaschine und den Fügekomponenten Draht und Substrat zahlreiche Prozessanforderungen erfüllen muss. Vor allem der Werkzeugverschleiß und die resultierende Abnahme der Verbindungsfestigkeit stellen wesentliche Herausforderungen dar, die sich insbesondere durch eine Umstellung des Prozesses von Aluminium- auf Kupferdraht in einer geringeren Werkzeugnutzungsdauer äußern.

In dieser Arbeit wird ein Simulationsverfahren entwickelt, mit dem Bondwerkzeuge modellbasiert analysiert und prozessgerecht gestaltet werden können. Auf Basis eines energetischen Modellansatzes wird durch Ermittlung der lokal verrichteten Reibarbeit ein kontinuierlicher Werkzeugverschleiß in einem räumlichen Finite-Elemente-Modell nachgestellt. Zudem wird die verrichtete Reibarbeit genutzt, um die Abhängigkeit des Verschleißes von der Draht/Substrat-Anbindung samt Befreiung von Oxidschichten zu berücksichtigen. Anhand einer modellbasierten Analyse werden die Verschleißursachen und -auswirkungen auf den bestehenden Prozess identifiziert. Darauf aufbauend werden Effekte der wesentlichen Geometriebestandteile auf den Verschleiß sowie die Anbindung mittels Parameterstudien aufgedeckt. Durch das Simulationsverfahren wird außerdem die Auslegung von Werkzeugen für neue Applikationen ermöglicht. Dies wird anhand eines Anwendungsbeispiels für das mehrdimensionale Ultraschallbonds von Anschlusssteckern an einem Demonstrator belegt.

Abstract

Ultrasonic wire bonding is an established joining technology in electronic packaging for decades. The connection is produced by friction welding using an ultrasonic vibration of the bonding tool, which has to fulfil multiple demands due to interface function between the bonding machine and the joining partners wire and substrate. Above all, the tool wear and the resulting decrease in the bond strength pose significant challenges, which result especially by the changeover of the process from aluminium to copper wire in a reduced tool life cycle.

In this thesis, for model based analysis and process-oriented design of bonding tools a simulation method is developed. Based on an energetic model concept determining the locally work done by friction continuous tool wear is simulated within a 3D finite element model. Furthermore, the friction work is used to take the wear dependence on the wire/substrate interconnection including the removal of the oxid layer into account. Conducting a model-based analysis, the causes of wear and consequent impacts on the current process are identified. In addition, parameter studies are performed to disclose effects of tool geometry on tool wear as well as on wire/substrate-interconnection. Furthermore, the simulation method provides an opportunity to develop tools for new applications. This is shown by an application example for the multi-dimensional ultrasonic bonding of connector pins on a demonstrator.

Vorveröffentlichungen

Teile der vorliegenden Dissertation oder Vorarbeiten hierzu wurden in den nachfolgenden Artikeln zuerst veröffentlicht.

Begutachtete Beiträge in Tagungsbänden

EICHWALD, P.; ALTHOFF, S.; SCHEMMELE, R.; SEXTRO, W.; UNGER, A.; BRÖKELMANN, M.; HUNSTIG, M.: Multi-dimensional Ultrasonic Copper Bonding - New Challenges for Tool Design. Proceedings of the 50th International Symposium on Microelectronics 2017, 2017.

EICHWALD, P.; UNGER, A.; EACOCK, F.; ALTHOFF, S.; SEXTRO, W.; GUTH, K.; BRÖKELMANN, M.; HUNSTIG, M.: Micro Wear Modeling in Copper Wire Wedge Bonding. IEEE CPMT Symposium Japan 2016, 2016.

EICHWALD, P.; SEXTRO, W.; ALTHOFF, S.; EACOCK, F.; UNGER, A.; MEYER, T.; GUTH, K.: Analysis Method of Tool Topography Change and Identification of Wear Indicators for Heavy Copper Wire Wedge Bonding. Proceedings of the 47th International Symposium on Microelectronics, 2014.

EICHWALD, P.; SEXTRO, W.; ALTHOFF, S.; EACOCK, F.; SCHNIETZ, M.; GUTH, K.; BRÖKELMANN, M.: Influences of Bonding Parameters on the Tool Wear for Copper Wire Bonding. 15th Electronics Packaging Technology Conference, 2013.

DYMEL, C.; EICHWALD, P.; SCHEMMELE, R.; HEMSEL, T.; BRÖKELMANN, M.; HUNSTIG, M.; SEXTRO, W.: Influences of process parameters on micro weld formation in a novel multidimensional copper-copper bonding process. 7th Electronics System-Integration Technology Conference, 2018.

EACOCK, F.; UNGER, A.; EICHWALD, P.; GRYDIN, O.; HENGSEBACH, F.; ALTHOFF, S.; SCHAPER, M.; GUTH, K.: Effect of Different Oxide Layers on the Ultrasonic Copper Wire Bond Process. IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference 2016, 2016.

UNGER, A.; SCHEMMELE, R.; MEYER, T.; EACOCK, F.; EICHWALD, P.; ALTHOFF, S.; SEXTRO, W.; BRÖKELMANN, M.; HUNSTIG, M.; GUTH, K.: Validated Simulation of the Ultrasonic Wire Bonding Process. IEEE CPMT Symposium Japan 2016, 2016.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

xiii

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung und Technik	4
2.1	Tribologische Grundlagen	4
2.1.1	Tribotechnische Systeme	4
2.1.2	Aufbau technischer Oberflächen	5
2.1.3	Reibung	6
2.1.4	Verschleiß	7
2.2	Ultraschallbonden	9
2.2.1	Bondmaschine und -prozess	10
2.2.2	Eindimensionales Ultraschallbonden	13
2.2.3	Mehrdimensionales Ultraschallbonden	14
2.2.4	Herstellung von Leistungshalbleitermodulen	17
2.3	Werkzeuge für das Ultraschallbonden	19
2.3.1	Beschaffenheit des Werkzeugs	20
2.3.2	Werkzeuggeometrie und -varianten	22
2.3.3	Werkzeugmaterial und -herstellung	23
2.3.4	Kräfte am Bondwerkzeug	24
2.4	Finite-Elemente-Simulation	25
2.4.1	Nichtlineare FEM mit Reibung und großen Verformungen	27
2.4.2	FE-Simulation mittels Hochleistungsrechner	28
3	Verschleißanalyse von Werkzeugen beim Kupferdrahtbonden	29
3.1	Verschleiß von Bondwerkzeugen aus Wolframcarbid	30
3.1.1	Allgemeines Verschleißverhalten von Wolframcarbid-Cobalt	31
3.1.2	Ursachen für Werkzeugverschleiß beim US-Drahtbonden	31
3.1.3	Verschleißmechanismen beim Kupfer-Dickdrahtbonden	33
3.1.4	Verschleißerscheinungsform und Folgen für die Scherfestigkeit	34
3.2	Einfluss von Bondprozess und Werkzeuggeometrie auf den Verschleiß	38
3.3	Schlussfolgerungen für die Modellierung	42
4	Modellbildung für den Bondprozess mittels FEM	44
4.1	Modellierung des Bondprozesses	46
4.1.1	Drahtvordeformation	46
4.1.2	Entfestigung des Drahts	47
4.1.3	Werkzeugamplitude	49
4.2	Modellierung des Verbindungsaufbaus zwischen Draht und Substrat	50
4.2.1	Oxidschichtreinigung	51

4.2.2	Anbindung zwischen Draht und Substrat	52
4.3	Modellierung von Werkzeugverschleiß	54
4.3.1	Verschleißberechnung für die finiten Elemente	55
4.3.2	Ermittlung des Verschleißkoeffizienten	57
4.4	Programmtechnische Realisierung des Modells	57
4.5	Einfluss der Modellparameter	59
4.5.1	Diskretisierung der finiten Elemente	59
4.5.2	Berechnungsschrittweite	60
4.6	Berechnungsdauer des FE-Modells	61
5	Modellvalidierung	63
5.1	Validierung des Anbindungsmodells	63
5.2	Validierung des Verschleißmodells	66
5.2.1	Bestimmung des Verschleißvolumens des Werkzeugs	66
5.2.2	Bestimmung der Reibarbeit im Werkzeug/Draht-Kontakt	68
5.2.3	Vergleich zwischen Messung und Simulation	68
6	Modellbasierte Analyse	70
6.1	Analyse des gegenwärtigen Bondwerkzeugs	71
6.1.1	Reibhysterese beim Ultraschallbonden	71
6.1.2	Reibarbeit als Ursache für die Verschleißerscheinung	73
6.1.3	Folgen von Werkzeugverschleiß	76
6.2	Parameterstudien der Werkzeuggeometrie	78
6.2.1	Statistische Versuchsplanung	78
6.2.2	Eingrenzung des Parameterraums	80
6.2.3	Effekte und Wechselwirkungen	84
6.2.4	Werkzeugverschleiß bei verschiedenen Öffnungswinkeln	88
7	Werkzeuge für das mehrdimensionale US-Bonden	91
7.1	Vorgehen bei der Werkzeugentwicklung	92
7.2	Kontaktbestimmende Werkzeugauslegung	93
7.2.1	Kontaktbestimmende Anforderungen an das Bondwerkzeug	94
7.2.2	Modellaufbau	94
7.2.3	Ergebnisse der kontaktbestimmenden Werkzeugauslegung	95
7.3	Dynamische Werkzeugauslegung	96
7.3.1	Dynamische Anforderungen an das Bondwerkzeug	96
7.3.2	Modellaufbau und Vorgehen bei der dynamischen Auslegung	97
7.3.3	Ergebnisse der dynamischen Werkzeugauslegung	98
7.4	Werkzeugerprobung	99
7.4.1	Vermessung des Schwingensystems	101
7.4.2	Einfluss der Werkzeugtrajektorie auf die Scherfestigkeit	102
7.4.3	Einfluss der Prozessparameter auf die Scherfestigkeit	104
7.4.4	Werkzeugverschleiß	107
7.5	Schlussfolgerung für den Einsatz in der Produktionslinie	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	109
8.1	Zusammenfassung	109
8.2	Ausblick	112

A	Anhang	123
A.1	Materialdaten	123
A.2	Approximierte Polynomfunktion für den Reinigungsgrad	123
A.3	Konfiguration der Simulationsrechner	123
A.4	Parameterräume der statistischen Versuchspläne	124
A.5	Werkstoffauswahl	126
A.6	Schaft/Werkzeug-Konfigurationen	126
A.7	Demonstrator für das mehrdimensionale Ultraschallbonden	127

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Aus Gründen der Kompaktheit enthält dieses Verzeichnis verwendeter Formelzeichen nur Zeichen, die an mehreren Stellen verwendet werden oder von wesentlicher Bedeutung sind.

α	Öffnungswinkel des Werkzeugkeils
γ	Anbindungsgrad
ε	Dehnung, Exzentrizität, Regressionsfehler
η	Vergrößerungsfaktor von Bondnormalkraft F_B zu Keilnormalkraft F_{NK}
μ	Reibwert
σ	Normalspannung
τ_m	Mittlere Schubfestigkeit
τ_S	Reibschubspannung
φ	Phasenwinkel
ω	Kreisfrequenz
A_0	Nominell angenommene Kontaktfläche von Draht und Substrat
A_D	Drahtquerschnittsfläche
A_{DS}	Kontaktfläche Draht/Substrat
A_{eff}	Effektiv verschweißte Fläche im Bondinterface
A_n	Nominell angenommene Kontaktfläche von Grund- und Gegenkörper
A_r	Reale Kontaktfläche von Grund- und Gegenkörper
A_{WS}	Kontaktfläche Werkzeug-Unterkannte/Substrat
c	Steifigkeit des Bondguts, Konstante des Regressionsmodells
D_D	Drahtdurchmesser
E	Energie, Elliptisches Integral
e_r	Reibungsenergiedichte
e_r^*	Scheinbare Reibungsenergiedichte
F_B	Bondnormalkraft
F_N	Normalkraft, die senkrecht auf eine Oberfläche wirkt
F_{NK}	Normalkraft auf Keilfläche des Werkzeugs
F_R	Reibkraft
F_{RK}	Reibkraft auf Keilfläche des Werkzeugs

F_S	Scherkraft
F_T	Tangentialkraft
F_{TD}	Touchdownkraft
f	Betriebsfrequenz des Ultraschalltransducers
G_D	Schubmodul des Drahtmaterials
H	Härte nach Vickers
h	Drahthöhe
h_S	Scherhöhe
h_{TD}	Touchdownhöhe – Vertikalabstand zwischen Werkzeug-Unterkante und Substrat nach der Drahtvordeformation
h_V	Verschleißhöhe
I_h	Lineare Verschleißintensität
I_{WC}	Verschleiß-Proportionalitätsfaktor
K	Verschleißkoeffizient
K_H	Dimensionsloser Verschleißkoeffizient
n	Anzahl der Schwingzyklen
P_R	Reibleistung
p	Anzahl der Bondverbindungen
s_{rel}	Relativverschiebung von Grund- und Gegenkörper
s_R	Reibweg
s_{WD}	Reibweg zwischen Werkzeug und Draht
$\hat{s}_{W,eff}$	Effektive Auslenkungsamplitude der Werkzeugspitze
t_B	Bonddauer
U_{US}	Angelegte Spannung am Ultraschalltransducer
$\hat{u}_c$	Auslenkungsamplitude des Bondguts
$\hat{u}_W$	Auslenkungsamplitude der Werkzeugspitze
V_R	Werkstoffvolumen, das am Reibungsprozess beteiligt ist
V_V	Verschleißvolumen
V_W	Gesamtvolumen des Werkzeugs
v_{mess}	Geschwindigkeit des Laservibrometrie-Messpunkts
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
$\hat{v}_{W,eff}$	Effektive Geschwindigkeitsamplitude der Werkzeugspitze
W_R	Reibarbeit, die im Reibkontakt verrichtet wird
x^*, y^*, z^*	Körperfeste Koordinaten auf der Werkzeugkeilfläche
$\underline{Y}_{el}$	Elektrische Admittanz der Transducerspannung
z_W	Auslenkung des Werkzeugs in z -Richtung