

Hüseyin Erdogan

**Einfluss unterschiedlicher Geometrien
und Werkstoffsysteme auf den Fügeprozess
und die Eigenschaften von massiven
Einpressverbindungen**



Herbert Utz Verlag · München

Verfahrenstechnik

D 83

Zugl.: Diss., Berlin, Techn. Univ., 2007

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0736-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Projektleiter bei der Continental Automotive Systems in Ingolstadt im Zeitraum von Februar 2004 bis März 2007, in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten für „Füge- und Beschichtungstechnik“ und Mikro- und Feingeräte“ der Technischen Universität Berlin!

Herrn Prof. Dr. Ing. Dr. h.c. L. Dorn, Professor des Lehrstuhls „Füge- und Beschichtungstechnik“ danke ich sehr herzlich für die engagierte Förderung, die er mir während der Betreuung meiner Arbeit zuteil werden ließ, sowie für die zahlreichen produktiven Diskussionen und Vorschläge.

Einen gleichermaßen großen Beitrag zum Gelingen dieser Forschungsarbeit lieferte Herr Prof. Dr. rer. Nat. M. Schmidt, Professor des Lehrstuhls „Mikro- und Feingeräte“. Ihm möchte ich ebenso danken. Durch seine ebenfalls gewissenhafte Betreuung dieser Arbeit konnte er nützliche und kreative Anregungen geben.

Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Herrmann, der sich bereit erklärt hat, den Vorsitz im Promotionsausschuss zu übernehmen.

An einem solchen Projekt sind nicht nur Mitarbeiter der mitwirkenden Hochschule sondern auch Supporter der „Continental Automotive Systems“ beteiligt.

Hier stehen an erster Stelle die Personen, welche durch Ihre Rolle als Entscheider die notwendigen Kapazitäten und Ressourcen, die für die Durchführung einer Arbeit in der Grundlagenforschung nötig sind, bereitstellten.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. V. Kleikemper, Abteilungsleiterin des Bereiches Konstruktion / Komfort, für die Ermöglichung und die Budgetierung dieser Arbeit. An dieser Stelle sei ein herzlicher Dank für die zahllosen fachlichen Diskussionen und die hervorragende Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. W. Thiel und Herrn Dr. D. Riese.

Ebenso möchte ich Herrn B. Kohl, Leiter der Werke Ingolstadt und Nürnberg und Herrn Dipl.-Ing. R. Wolfschläger, Leiter des Produktionscenter – Ingolstadt, herzlich danken.

Herrn Dipl.-Phy. W. Niebler's Team sowie auch Herr Dipl.-Ing. J. Schäfer und Herr Dipl.-Ing. R. Schlenker, alle tätig in der EBS Entwicklung und Konstruktion – Ingolstadt, sind darüber hinaus lobend zu erwähnen. Sie stellten die Anlagen, sowie Ihre Zeit und Kompetenz zur Verfügung und trugen somit wesentlich zum Gelingen der praktischen Arbeit bei.

Ferner gilt mein Dank auch Herrn Dipl.-Ing. G. Balbierer, Herrn Dipl.-Ing. J. Scherer, Herrn M. Klepzig, Herrn J. Fröhlich, Herrn R. Plank, Herrn Dr. R. Kohl und Herrn Dipl.-Ing. S. Nahm.

Allerdings sind auch jene Kollegen zu würdigen, welche mich durch die Durchsicht meiner Arbeit anregen konnten und mich mit kritischen Diskussionen stets zum Hinterfragen und Verbessern meiner Ergebnisse trieben.

Dank möchte ich darüber hinaus meinen Eltern aussprechen, die mich von Jugend an ermutigt, unterstützt und meinen Weg intensiv begleitet haben.

Hüseyin Erdogan

Inhaltsverzeichnis

VORWORT.....	I
ABSTRACT.....	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XVII
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 LITERATURAUSWERTUNG UND STAND DER TECHNIK.....	5
2.1 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER EINPRESSTECHNIK.....	5
2.2 TECHNOLOGIE DER EINPRESSTECHNIK	6
2.2.1 Leiterplatte und Durchkontaktierung.....	8
2.2.2 Bindemechanismus - Verbindungstheorie.....	11
2.3 FÜGEPARAMETER UND FEHLERQUELLEN.....	17
2.4 KRITISCHE BETRACHTUNG DER NORM DIN EN 60352-5:2001+A1:2003.....	20
2.5 VORTEILE UND NACHTEILE LÖTFREIER EINPRESSVERBINDUNGEN	24
2.6 BISHIER VORLIEGENDE ERGEBNISSE.....	24
3 VERSUCHSPLANUNG	27
3.1 VERSUCHSPROGRAMM	27
3.2 VORGEHENSWEISE.....	27
4 VERSUCHSMATERIALIEN, VERSUCHSAUFBAU UND PRÜFVERFAHREN	31
4.1 VERSUCHSMATERIALIEN UND WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN	31
4.1.1 Auswahl der Pins	31
4.1.2 Auswahl der Leiterplatten	34
4.1.3 Ausgewählte Leiterplatten- und Pinvarianten.....	36
4.1.4 Werkstoffeigenschaften	37
4.2 VERSUCHSAUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	39
4.3 PRÜFVERFAHREN.....	41
4.3.1 Optische Messungen	41
4.3.2 Lichtmikroskopie.....	41
4.3.3 Rasterelektronenmikroskopie.....	41
4.3.4 Elektrische Prüfung.....	44
5 VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION	47

5.1	ERGEBNISSE AUS OPTISCHEN MESSUNGEN	47
5.1.1	<i>Optische Messung der Endloch-Nenn Durchmesser</i>	47
5.1.2	<i>Optische Messung der Pingeometrie</i>	48
5.2	ERGEBNISSE AUS DEN EIN- UND AUSPRESSVERSUCHEN MIT 2,8ER-PINS	50
5.2.1	<i>Ergebnisse für die Leiterplatte mit der Beschichtung chemisch Zinn</i>	52
5.2.1.1	Ergebnisse aus der allgemeinen Versuchsreihe	52
5.2.1.2	Ergebnisse zum Chargeneinfluss (Spezialversuch 1)	61
5.2.1.3	Ergebnisse aus verschiedenen Auspressrichtungen (Spezialversuch 2)	64
5.2.2	<i>Ergebnisse für die Leiterplatte mit der Beschichtung chemisch Nickel-Gold</i>	68
5.2.2.1	Ergebnisse aus der allgemeinen Versuchsreihe	68
5.2.2.2	Ergebnisse zum Chargeneinfluss (Spezialversuch 1)	74
5.2.2.3	Ergebnisse aus verschiedenen Auspressrichtungen (Spezialversuch 2)	76
5.2.3	<i>Vergleich der Ergebnisse aus den Ein- und Auspressversuchen mit 2,8er-Pins auf den Leiterplatten mit den Beschichtungen chemisch Zinn und chemisch Nickel-Gold</i>	79
5.2.4	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse für 2,8er-Pins</i>	82
5.3	ERGEBNISSE AUS DEN EIN- UND AUSPRESSVERSUCHEN MIT MIDI-PINS	86
5.3.1	<i>Ergebnisse für die Leiterplatte mit der Beschichtung chemisch Zinn</i>	90
5.3.1.1	Ergebnisse aus der allgemeinen Versuchsreihe	90
5.3.1.2	Ergebnisse zum Chargeneinfluss (Spezialversuch 1)	97
5.3.1.3	Ergebnisse aus verschiedenen Auspressrichtungen (Spezialversuch 2)	101
5.3.2	<i>Ergebnisse für die Leiterplatte mit der Beschichtung chemisch Nickel-Gold</i>	102
5.3.2.1	Ergebnisse aus der allgemeinen Versuchsreihe	102
5.3.2.2	Ergebnisse zum Chargeneinfluss (Spezialversuch 1)	108
5.3.2.3	Ergebnisse aus verschiedenen Auspressrichtungen (Spezialversuch 2)	111
5.3.3	<i>Vergleich der Ergebnisse aus den Ein- und Auspressversuchen mit MIDI-Pins auf den Leiterplatten mit den Beschichtungen chemisch Zinn und chemisch Nickel-Gold</i>	113
5.3.4	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse für MIDI-Pins</i>	117
5.4	SIMULATION DER VERFORMUNGEN UND DER SPANNUNGSVERTEILUNG IN DER KUPFERHÜLSE DURCH 2,8ER- UND MIDI-PINS	120
5.5	DURCHGANGSWIDERSTAND	126
5.6	LICHTMIKROSKOPIE UND RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE.....	130
5.6.1	<i>Lichtmikroskopie</i>	131
5.6.2	<i>Rasterelektronenmikroskopie für die chemisch verzinnete Leiterplatte</i>	133
5.6.2.1	Bruchflächenanalyse	133
5.6.2.2	Spektralanalyse.....	136
5.6.2.3	Line-Scan-Analyse	138
5.6.3	<i>Rasterelektronenmikroskopie für die Nickel-Gold beschichtete Leiterplatte</i>	142
5.6.3.1	Bruchflächenanalyse	142
5.6.3.2	Spektralanalyse.....	144
5.6.3.3	Line-Scan-Analyse	146
5.6.4	<i>Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse aus den REM-Analysen</i>	148

6	DEFINITION DER PROZESSFELDER FÜR 2,8ER-PINS UND MIDI-PINS	151
6.1	DEFINITION DER PROZESSFELDER IN ABHÄNGIGKEIT DER EIN- UND AUSPRESSKRAFT SOWIE DEM PIN- UND ENDLOCHDURCHMESSER	152
6.2	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	161
7	ZUSAMMENFASSUNG	165
	LITERATURVERZEICHNIS	169
	ANHANG	175

1 Einleitung und Zielsetzung

Neben einer Vielzahl möglicher Alternativen, elektrische Komponenten in Baugruppen zu integrieren, zeichnet sich die Einpresstechnik als rein mechanisches Verfahren zur Montage besonders aus. In vielen Einsatzgebieten der Industrie konnten ihre technischen wie auch wirtschaftlichen Vorteile gegenüber herkömmlichen Verbindungstechniken, wie beispielsweise Löt- oder Klebverfahren, überzeugen. Anwendungsgebiete der Einpresstechnik finden sich derzeit in Bereichen der Informationstechnologie, der Telekommunikation, der Bahn- und Luftfahrtindustrie sowie in der Automobil- und Automatisierungstechnik. Zahlreiche neue Anwendungen für Sicherheit, Komfort und Leistung lassen sich in diesen Industriezweigen nur durch den gezielten Einsatz der Einpresstechnik realisieren.

Die grundsätzliche Technologie der Einpresstechnik beruht auf dem Einpressen eines speziell geformten metallischen Stiftes, der massiv oder flexibel ausgeführt sein kann, in die durchmetallisierte Bohrung einer Leiterplatte. Wesentliches Merkmal hierbei ist, dass der Stift im Querschnitt eine größere Diagonale aufweist als das durchmetallisierte Leiterplattenloch. Beim Eindrücken des Stiftes in das Leiterplattenloch entsteht eine Überpressung, die entweder durch Deformierung des Leiterplattenloches – bei Verwendung massiver Einpresszonen – oder, beim Einsatz flexibler Stifte, durch die Verformung deren elastischer Bereiche aufgenommen wird. Durch das Übermaß des Einpressstiftes entsteht eine gasdichte, elektrisch gut leitende Verbindung aufgrund einer Kaltverschweißung an den Berührungsflächen zwischen dem Stift und dem durchmetallisierten Leiterplattenloch. Das Verhalten der Einpressverbindung hängt dabei von den Maßen des speziell geformten Einpressstiftes und dessen verwendeten Werkstoffen in Verbindung mit den Maßen und Werkstoffen des durchmetallisierten Loches in der Leiterplatte ab.

Im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit werden sich die Untersuchungen auf Einpressverbindungen mit massiven Einpressstiften konzentrieren. Mit engeren Lochtoleranzen stellen diese höhere Anforderungen an die Technik als die flexiblen Stifte, was unter anderem der Grund dafür war, dass sie sich im Gegensatz zur flexiblen Ausführung bisher nicht auf dem Markt durchgesetzt haben. Neue technologische Anforderungen an den Funktionsumfang und die Strombelastbarkeit elektrisch leitender Verbindungen sowie der Kostendruck lassen den Einsatz massiver Einpresszonen jedoch immer mehr in den Vordergrund treten. Ein großes Potential für die massive Einpresstechnik liegt dabei in ihren Vorteilen gegenüber der flexiblen Einpresstechnik, wie beispielsweise die höhere Strombelastbarkeit, die Hochfrequenztauglichkeit und die kostengünstige Herstellung ihrer Einpresszone. Gerade auch vor dem Hintergrund des Bleiverbotes ab 2006 in der Elektronikfertigung gewinnt die massive Einpresstechnik als wirtschaftliche und recyclingfreundliche Verbindungstechnologie immer mehr an Wichtigkeit. In diesem Zusammenhang stellt sie durch ihre Umweltfreundlichkeit eine zukunftsweisende Perspektive für die bleifreie Verbindungstechnik dar.

In der DIN EN 60352-5 [DIN 2003] werden allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise zu lötfreien Einpressverbindungen beschrieben. Massive Einpressstifte werden lediglich in einem normativen Anhang behandelt, in dem die Abweichungen vom Hauptteil der Norm, der die flexiblen Stifte beinhaltet, zusammengefasst sind. Eine gewissenhafte Übertragung der Ausführungen über flexible Einpresszonen auf massive ist in diesem Zusammenhang bedenklich, da diese dem realen physikalischen Verhalten massiver Einpresszonen nicht überall gerecht werden. Zum Einpressen von massiven Stiften werden höhere Einpresskräfte benötigt. Die durch das Übermaß des Einpressstiftes hervorgerufene Überpressung im Leiterplattenloch muss dabei allein durch eine starke Verformung des Leiterplattenloches aufgenommen werden. Quantitative Angaben zu maximal zulässigen Einpresskräften zur Verhinderung einer Beschädigung der Leiterplattenhülse sind nicht bekannt. Über weitere Fügeparameter wie Maße, Form sowie Toleranzen der Einpresszonen und die Oberflächenbehandlung der Fügepartner sind ebenfalls keine Aussagen bekannt und müssen nach der DIN EN 60352-5 [DIN 2003] von den Herstellern festgelegt werden. Darüber hinaus muss der Hersteller einen Mindestwert für die Auspresskraft des Einpressstiftes festlegen, der neben der mechanischen Stabilität auch die elektrische Funktionsfähigkeit der Einpressverbindung sichert. Aufgrund der jahrelangen Erfahrungen können diese Angaben für die Einpresstechnik mit flexiblen Einpresszonen von den Herstellern ohne Probleme zur Verfügung gestellt werden. Auf dem Gebiet der massiven Einpresstechnik dagegen fehlen diese Erfahrungen insbesondere in der Elektronikbranche. Bei ihr handelt es sich in dieser Branche um eine Technologie mit neuen Randbedingungen. Die Hersteller der Einpresszonen sind daher größtenteils nicht in der Lage, die erforderlichen Angaben für eine zuverlässige Einpressverbindung mit massiven Einpresszonen zu liefern.

Vor diesem Hintergrund liegt das Ziel dieser vorliegenden Arbeit darin, diejenigen Fügeparameter zu ermitteln und zu optimieren, bei denen mechanisch und elektrisch zuverlässige Einpressverbindungen mit massiven Einpresszonen erzielt werden können. Dafür müssen für die Einpresstechnik mit massiven Einpresszonen einerseits optimale Durchmesser und Toleranzwerte für das Leiterplattenloch definiert werden. Andererseits ist eine optimale Formgebung der Einpressstifte mit entsprechenden Toleranzangaben erforderlich, wobei nicht alleine die Festlegung der geometrischen Abmessungen, sondern auch ihre Feinausführung ausschlaggebend ist. Dazu zählt insbesondere die Prägung der Kanten, die einen bedeutenden Einfluss auf das Einpressverhalten hat. Darüber hinaus muss der Einfluss verschiedener Werkstoffpaarungen zwischen dem durchmetallisierten Leiterplattenloch und dem Stift auf die Einpressverbindung geklärt werden. In diesem Zusammenhang sind reibungs- und werkstoffphysikalische Prozesse in den Mikroverbindungen näher zu betrachten. Insbesondere die Phänomene der Reibung zwischen Festkörpern sowie der Adhäsion und Diffusion zwischen zwei Metallen müssen in die Betrachtungen einbezogen werden.

Zur Klärung dieser Wissenslücken werden im Rahmen dieser vorliegenden Arbeit für ausgewählte Leiterplatten mit verschiedenen Lochdurchmessern und Oberflächenbehandlungen sowie Einpressstiften mit verschiedenen Formen, Prägungen und Oberflächen Einpressverbindungen hergestellt und verschiedenen Prüfverfahren unterzogen. Es werden die notwendigen Ein- und Auspresskräfte der Stifte gemessen und die Lochverformung in der Leiterplatte über Schlifffbilder ermittelt. Darüber hinaus werden elektrische Prüfungen und metallographische Analysen durchgeführt, um Rückschlüsse auf mögliche Kaltverschweißungen der Fügepartner ziehen zu können.

Ziel ist es, eine für die Einpresstechnik mit massiver Einpresszone geeignete Geometrie- und Werkstoffkombination zwischen dem Leiterplattenloch und dem Einpressstift zu finden, mit der eine zuverlässige Einpressverbindung unter dem Aspekt der Ausbildung einer gasdichten Verbindung durch Kaltverschweißung zwischen dem Stift und dem oberflächenbehandelten durchmetallisierten Leiterplattenloch realisiert werden kann, die sowohl den mechanischen wie auch den elektrischen Anforderungen genüge leistet und in der Serienfertigung zur Anwendung kommt.

Aufbauend auf dieser Einleitung und Zielsetzung wird in Kapitel 2 eine Literaturauswertung vorgenommen und der Stand der Technik bezüglich der Einpresstechnologie dargestellt. Dem schließt sich in Kapitel 3 die Versuchsplanung für die experimentellen Untersuchungen an. Die Versuchsmaterialien, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sowie die eingesetzten Prüfverfahren werden in Kapitel 4 vorgestellt. Kapitel 5 befasst sich mit den Versuchsergebnissen. Detailliert wird in diesem Kapitel auf den Einfluss der Geometrien und Werkstoffsysteme auf die Qualität der Einpressverbindung eingegangen. Es werden die Ergebnisse aus den Ein- und Auspressversuchen, den Simulationen der Hülsen- deformation sowie den elektrischen und metallographischen Untersuchungen vorgestellt und diskutiert. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse wird in Kapitel 6 ein Prozessfeld für eine sichere Einpressverbindung mit massiven Einpresszonen definiert. Es werden Schlussfolgerungen für den praktischen Einsatz des Verfahrens gezogen und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben. Die wichtigsten Ergebnisse dieser vorliegenden Arbeit werden abschließend in Kapitel 7 zusammengefasst.

