APPLIKATIONSBERICHT

Verbesserung eines DoE zur Bondprozessoptimierung durch den Einsatz des BAMFIT-Verfahrens*

Prozessoptimierung beim Drahtbonden beginnt mit der (idealerweise) systematischen Einstellung der Bondparameter und der Bestimmung der Bondqualität anhand quantifizierbarer Parameter. Dazu zählen z.B. die Deformation der Bondstelle sowie die gemessenen Pull-/Scherkräfte und Bruchbilder im zerstörenden Test (gemäß DVS-Merkblatt 2811, Version 2/2017). Dabei ist bekannt, dass die einzelnen Testergebnisse in ihrer Aussagekraft eingeschränkt sind bzw. jeder Test gewisse Limitierungen mit sich bringt. Aufgabe dieses Beitrages soll es nun nicht sein, diese Limitierungen zu diskutieren, sondern die Möglichkeiten aufzuzeigen, die durch neue Verfahren mittlerweile möglich sind. Ein solches neues Verfahren ist BAMFIT – Bondtec Accelerated Mechanical Fatigue Interface Testing. Der Bondkontakt wird bei diesem Verfahren mit Hilfe einer mit Ultraschall angeregten Zange einer mechanischen Biegewechselbelastung unterzogen und so innerhalb von wenigen Sekunden von der Oberfläche abgelöst. Der durch die Biegewechselbelastung erzeugte Riss verläuft von den Rändern des Bondinterface ausgehend in das Drahtmaterial hinein. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass Riss genau dort beginnt, wo die beim Bondvorgang ausgebildete Verbindungszone (Bondinterface) endet.

Im vorgestellten Experiment wurden die Bondparameter für einen 300 µm Al-Dickdraht auf einem Cu-Blech mittels DoE-Methodik (Design of Experiment) optimiert. Zur Prüfung der erreichten Bondqualität wurden der Schertest und das BAMFIT-Verfahren angewandt. Die Prozess-Grundeinstellungen sind im grauen Kasten unten rechts zusammengefasst. Zur Erläuterung der Parameter siehe Abbildung 1. Als Eingangsgrößen des DoE (die veränderten Prozessgrößen bzw. Bondparameter) wurden folgende Bondparameter gewählt:

- US-Leistung
- Ramp Time
- Ramp End Force
- Burst Time

Als Zielgrößen (die messbaren Prozess-/Qualitätskennwerte) wurden festgelegt:

- Scherkraft
- Signal des Deformationssensors (je geringer der Wert, desto geringer deformiert ist der Bondkontakt)
- BAMFIT Zyklenzahl
- Verbundene Interfacefläche (Bruchbild nach BAMFIT Test)
- Längen-/Breitenverhältnis des Interface

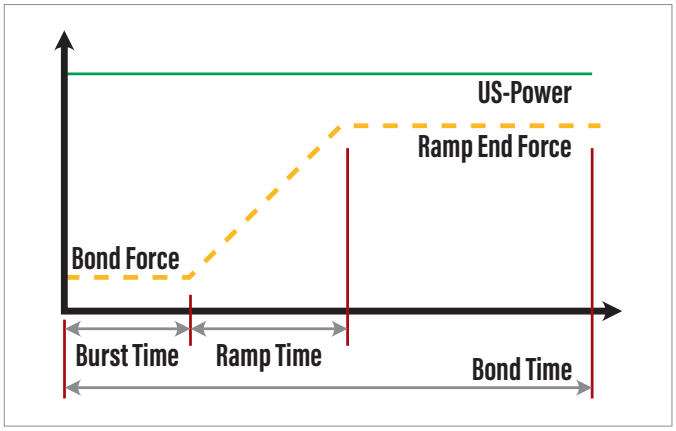

Abbildung 1: Erläuterung der Bondparameter während der Bondphase

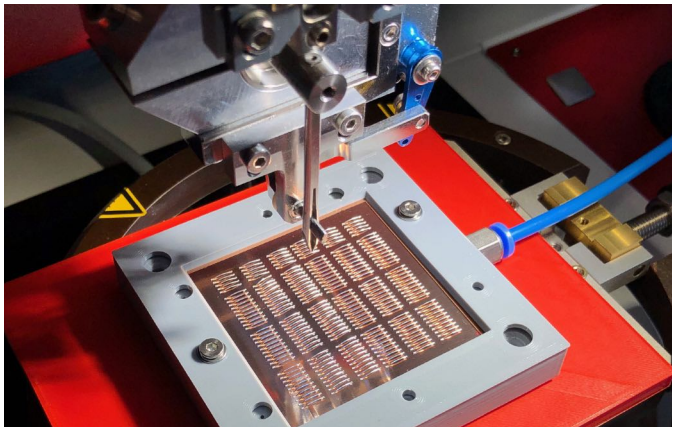

Abbildung 2: Versuchsaufbau – Substrat, Bondlayout, Halterung und BAMFIT-Testkopf

Bond- und Testparameter
Touchdown Kraft: 300 cN
Bondzeit: 140 ms
Bond Force: 300 cN
Ramp End Force (variiert): 500 – 900 cN
US-Leistung (variiert): 110 – 210 digits
Ramp-Time (variiert): 20 – 100 ms
Burst-Time (variiert) 1 – 37 ms
Default-Force: 300 cN
Drahtbonder: F&S Bondtec 5850
Bonddraht: Heraeus Al-H11 300 µm, RL 318 cN, D 22,7%
Bondfrequenz: 58 KHz
Schertester: F&S Bondtec 5600
Schertool: Breite 1,2 mm
Scherhöhe: 30 µm (10% Drahtdurchmesser)
BAMFIT-Tester: F&S Bondtec (58 kHz)
BAMFIT US-setting: 70 digits
BAMFIT pre-load: 40 cN
BAMFIT clamping-height: 30 µm (10% Drahtdurchmesser)

Das BAMFIT Verfahren ist eine Entwicklung der TU-Wien. Patentnummer: DE102016107028A1

Das Kupferblech war mit einer Folie zum Schutz vor Oxidation und mechanischer Beschädigung versehen. Diese Schutzfolie wurde direkt vor dem Bondvorgang abgezogen aber die Oberfläche nicht gesondert gereinigt, obwohl leichte unregelmäßige Schattierungen in der Schrägansicht erkennbar waren – die Realität ist nun einmal nicht optimal und das sollte im Experiment auch so abgebildet werden. Die Bondkontakte wurden untereinander so auf dem Cu-Blech angeordnet, dass in dieser Spalte eine komplette DoE-Parametervariation durchgeführt werden konnte. Am Beginn der Spalte wurden zusätzlich fünf Bondverbindungen als Dummy-Drähte erzeugt. Das heißt, diese Kontakte wurden später nicht bei den Tests berücksichtigt, sollten aber sicherstellen, dass die Anlage vor dem Bonden der zu untersuchenden Bondkontakte eingeschwungen ist. Diese Spalte wurde insgesamt 6 Mal gebondet, so dass für jede Parameterkombination 6 Messwerte vorlagen (Bondlayout siehe Abbildung 2). Eine Randomisierung des DoE-Plans wurde bewusst nicht vorgenommen, um eine spätere Zuordnung und Analyse der einzelnen getesteten Bondstellen zu erleichtern. Der Bondprozess erfolgt ohne Unterbrechung und für jeden einzelnen Bondkontakt wurde das Deformationssignal erfasst und gespeichert. Der Schertest und der BAMFIT-Test erfolgten jeweils vollautomatisch. Da beide Tests zerstörende Verfahren sind, wurde für jeden Test ein eigenes Cu-Blech mit Bondkontakten hergestellt. Die Scher- und BAMFIT-Werte wurden für jeden einzelnen Bondkontakt ermittelt und abgespeichert. Anschließend erfolgte die Vermessung des verbundenen Interfacebereichs am Lichtmikroskop an den mittels BAMFIT-Verfahren zerstörten Bondstellen. Die gesamte Untersuchung wurde ausschließlich am zweiten Bondkontakt (2nd Bond, Destination Bond) durchgeführt.

Die Mittelwerte der gemessenen Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die DoE-Auswertung erfolgte auf Basis der Einzelwerte, deren komplette Auflistung aber den Umfang der vorliegenden Publikation sprengen würde.

Tabelle 1: Testergebnisse (Mittelwerte)

DoE Durchlauf	DoE Punkttyp	US-Power [digits]	Ramp Time [ms]	Ramp End Force [cN]	Burst Time [ms]	Scherkraft [cN]	Deformation [digits]	Anzahl BAMFIT Zyklen [Anzahl]	Interfaceflächе [µm²]	BAMFIT Zyklen / Interfacefläche [1/µm²]	Verhältnis Interface Länge/Breite [µm/µm]
1	1	185	40	600	10	1128	8511	54758	122170	0,44882	1,30
2	1	135	80	600	10	1024	6664	24845	106399	0,23338	1,71
3	1	135	40	800	10	1198	8468	32398	133009	0,24259	1,88
4	1	185	80	800	10	1204	9757	93918	142885	0,65750	1,36
5	1	135	40	600	28	1016	6675	29805	106253	0,27904	1,85
6	1	185	80	600	28	1098	8240	58594	119027	0,49133	1,28
7	1	185	40	800	28	1169	9679	97948	143468	0,68073	1,38
8	1	135	80	800	28	1065	7794	37627	122836	0,30495	1,89
9	0	160	60	700	19	1135	8083	65266	128437	0,50742	1,57
10	0	160	60	700	19	1138	8134	56483	128008	0,44060	1,54
11	1	135	40	600	10	1018	6660	26001	109879	0,23569	1,75
12	1	185	80	600	10	1113	8277	66418	120790	0,54912	1,21
13	1	185	40	800	10	1192	9885	99426	147334	0,67421	1,38
14	1	135	80	800	10	1157	7832	34009	128541	0,26433	1,83
15	1	185	40	600	28	1112	8353	68048	122630	0,55483	1,25
16	1	135	80	600	28	1003	6505	24744	104515	0,23702	1,75
17	1	135	40	800	28	1132	8003	46027	131564	0,34940	1,84
18	1	185	80	800	28	1169	9490	100103	141467	0,70707	1,36
19	0	160	60	700	19	1155	8144	64028	129684	0,49255	1,51
20	0	160	60	700	19	1162	8286	67373	128179	0,52548	1,49
21	-1	110	60	700	19	862	6321	12941	102699	0,12480	2,22
22	-1	210	60	700	19	1115	9670	106898	138948	0,76792	1,09
23	-1	160	20	700	19	1183	8264	67945	133471	0,50715	1,51
24	-1	160	100	700	19	1127	7863	67083	126877	0,52728	1,55
25	-1	160	60	500	19	980	6807	40092	101955	0,39222	1,35
26	-1	160	60	900	19	1245	9570	86087	146099	0,58918	1,54
27	-1	160	60	700	1	1202	8187	52339	130630	0,40100	1,55
28	-1	160	60	700	37	1153	7997	56608	122497	0,46136	1,51
29	0	160	60	700	19	1184	8184	61901	128661	0,48176	1,48
30	0	160	60	700	19	1172	8045	60125	128764	0,46717	1,51

Der Schercode, also das Bruchbild im Schertest, wurde nicht mit in die Bewertung einbezogen. Typischerweise wird der Schercode in Klassen (meist 4) unterteilt. Solche Klassen (bzw. faktorielle Zielgrößen) lassen sich nur eingeschränkt in einem DoE auswerten. Besser sind stetige Messwerte, wie z.B. Flächen. Die Vermessung der Scherfläche und des Schersockels wäre ebenfalls eine Option gewesen. Dies wurde allerdings nicht durchgeführt, da Unsicherheiten bei der Messung der Scherfläche bestehen. Diese Unsicherheiten werden durch die „Ohren“ (seitlich herausgedrückte Bereiche eines Dickdrahtbonds) verursacht, die sich beim Bondvorgang ausbilden. Diese deformieren deutlich über das Bondinterface hinaus, tragen aber nicht zur Verbindungsfestigkeit bei. Oder anders formuliert: Im Bereich der „Ohren“ findet keine Verbindungsbildung statt aber im Schersockel sind die durchscherten „Ohren“ noch deutlich erkennbar. Abbildung 3 demonstriert diesen Sachverhalt anhand eines Vergleichs der Bruchflächen nach Schertest und nach BAMFIT-Test. Nach dem Schertest verbleibt, dort wo sich ein „Ohr“ befunden hat, ein Drahtmaterialsockel. Unter diesem Sockel hat aber keine Verbindungsbildung stattgefunden und daher trägt diese Fläche nicht zur Festigkeit des Kontaktes bzw. seiner Scherkraft bei. Eine Auswertung dieser zurückgebliebenen Sockelfläche wäre also mit einem systematischen Fehler behaftet, der abhängig von der Deformation der Bondstelle ist und bei zunehmender Deformation ebenfalls zunimmt.

Neben der Interfacefläche wurde auch die Form des Interface mit in die Auswertung einbezogen. Diese Form wird durch das Verhältnis aus Interfacelänge und Interfacebreite gebildet. Liegt dieses Verhältnis im Bereich 1,5 – 2 hat das Interface eine elliptische Form, während ein Wert nahe 1 eine Kreisform anzeigt (vgl. Abbildung 4). Derzeit liegt dem Autor kein publiziertes Wissen über die Auswirkung der Form eines Dickdraht-Bondinterface auf die Verbindungsqualität und -zuverlässigkeit vor. Nach Einschätzung basierend auf Erfahrungswerten ist vermutlich eine gleichmäßige elliptische Form anzustreben.

Die Auswertung des DoE erfolgte mit der Software Minitab v17. Messwertausreißer wurden nicht eliminiert, da klar erkennbare Fehler aufgrund von System-Fehlfunktionen nicht auftraten. Anschließend wurden für die einzelnen Zielgrößen die Auswertungen vorgenommen, nicht signifikante Terme eliminiert und überprüft, ob die ermittelten Modelle sinnvolle Zusammenhänge ergeben. Die ermittelten Haupteffekte sind in Abbildung 5 grafisch zusammengefasst. Die jeweils größten Steigungen weisen die Bondparameter US Power und Ramp End Force auf, d.h. diese Effekte haben den signifikantesten Einfluss auf die jeweilige Zielgröße. Um nun in dieser Publikation beispielhaft die Auswertung vorzunehmen und Schlussfolgerungen zu ziehen, sind für eben diese beiden Bondparameter (US Power und Ramp End Force) in Abbildung 6 die Konturdiagramme zusammengefasst. Diese zeigen, welchen Wert die jeweilige Zielgröße bei Einstellung der beiden Bondparameter annimmt. Die zwei anderen Eingangsgrößen (Ramp Time und Burst Time) waren in der Software auf feste Werte von Ramp Time = 85 ms und Burst Time = 23 ms eingestellt.

Scherkraft und Deformation der Bondkontakte steigen mit höheren Einstellungen für die Bondparameter an (Konturdiagramm in Abbildung 6 – links und mittig in der oberen Zeile). Die zunehmende Ramp End Force sorgt für eine bessere Annäherung der Oberflächen der Verbindungspartner

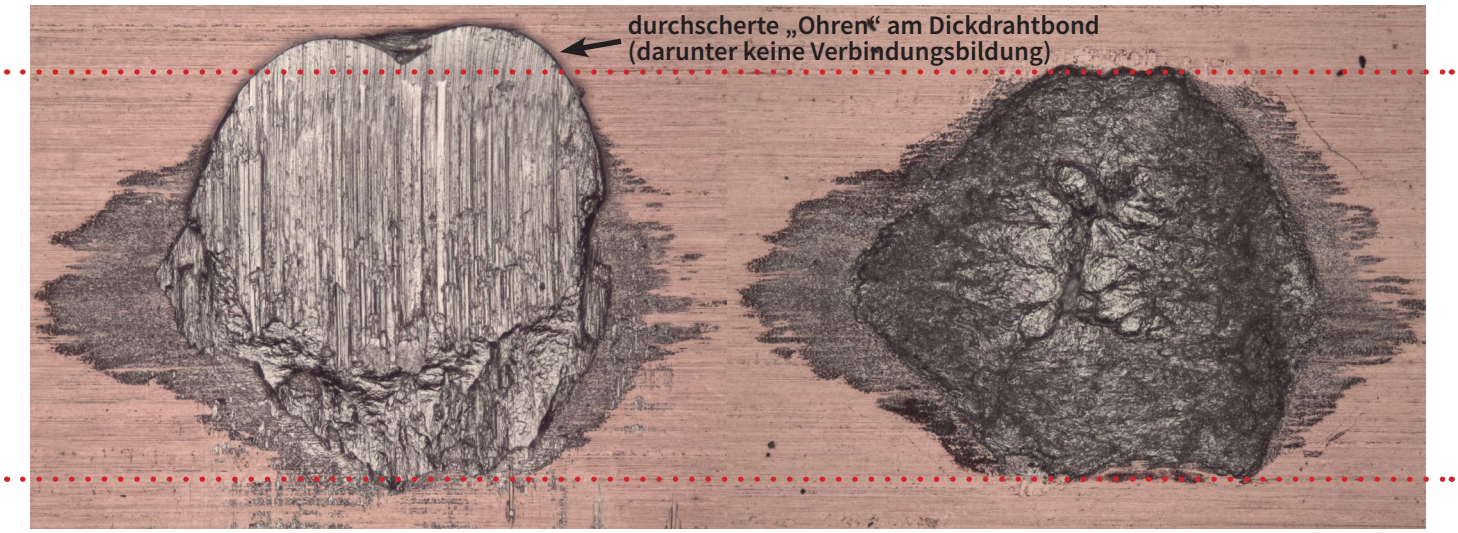

Abbildung 3: Vergleich der Bruchflächenbreite – Scherbruchfläche (links), BAMFIT Bruchbild (rechts)

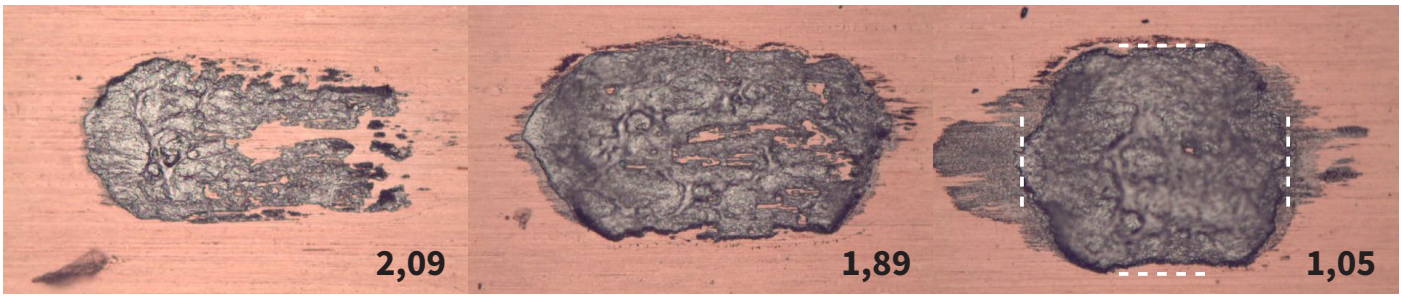

Abbildung 4: Interfaceflächen (nach BAMFIT) mit unterschiedlichem Verhältnis von Interfacelänge (links nach rechts) zu Interfacebreite (oben nach unten)

(Draht und Oberfläche) und die zunehmende US Power sorgt für den für die Verbindungsbildung wichtigen Energieeintrag (Reibenergie, Entfestigung des Drahtmaterials, Mobilisierung von Fehlstellen im Materialgefüge, Eintrag von Gitterschwingungen). Jeweils ab einer US Power von 170 – 180 digits nimmt die gemessene Scherkraft wieder ab. Dies wird vermutlich durch die bei höherem Ultraschalleintrag zunehmende Entfestigung des Materialvolumens im Bondkontakt verursacht. Der Schermeißel kann dieses entfestigte Drahtmaterial wesentlich einfacher bzw. bei geringerem Widerstand durchdringen. Das bedeutet, dass der Schertest eine Aussage über die Festigkeit des Bondinterface nur in Abhängigkeit vom Zustand des Drahtmaterials treffen kann. Das schränkt die Aussagekraft des Tests für manche Fragestellungen ein. Ein Scherkraftmaximum liegt bei einer mittleren US Power von ca. 165 digits.

Die Deformation nimmt mit steigenden Bondparametern stetig zu. Ähnlich verhält es sich bei der Entwicklung der Interfacefläche. Allerdings zeigt sich hier, dass ab einem gewissen Wert für die US Power keine Zunahme der Interfacefläche mehr erfolgt. Dieser Wert liegt bei ca. 180 digits. Erst mit einer Erhöhung der Ramp End Force kann eine weitere Zunahme der Interfacefläche erreicht werden.

Die BAMFIT-Zyklen erreichen ein Maximum bei den jeweils höchsten Einstellungen für US Power und Ramp End Force. Weiterhin ist zu erkennen, dass eine US Power von mindestens 160 digits gewählt werden sollte. Unterhalb

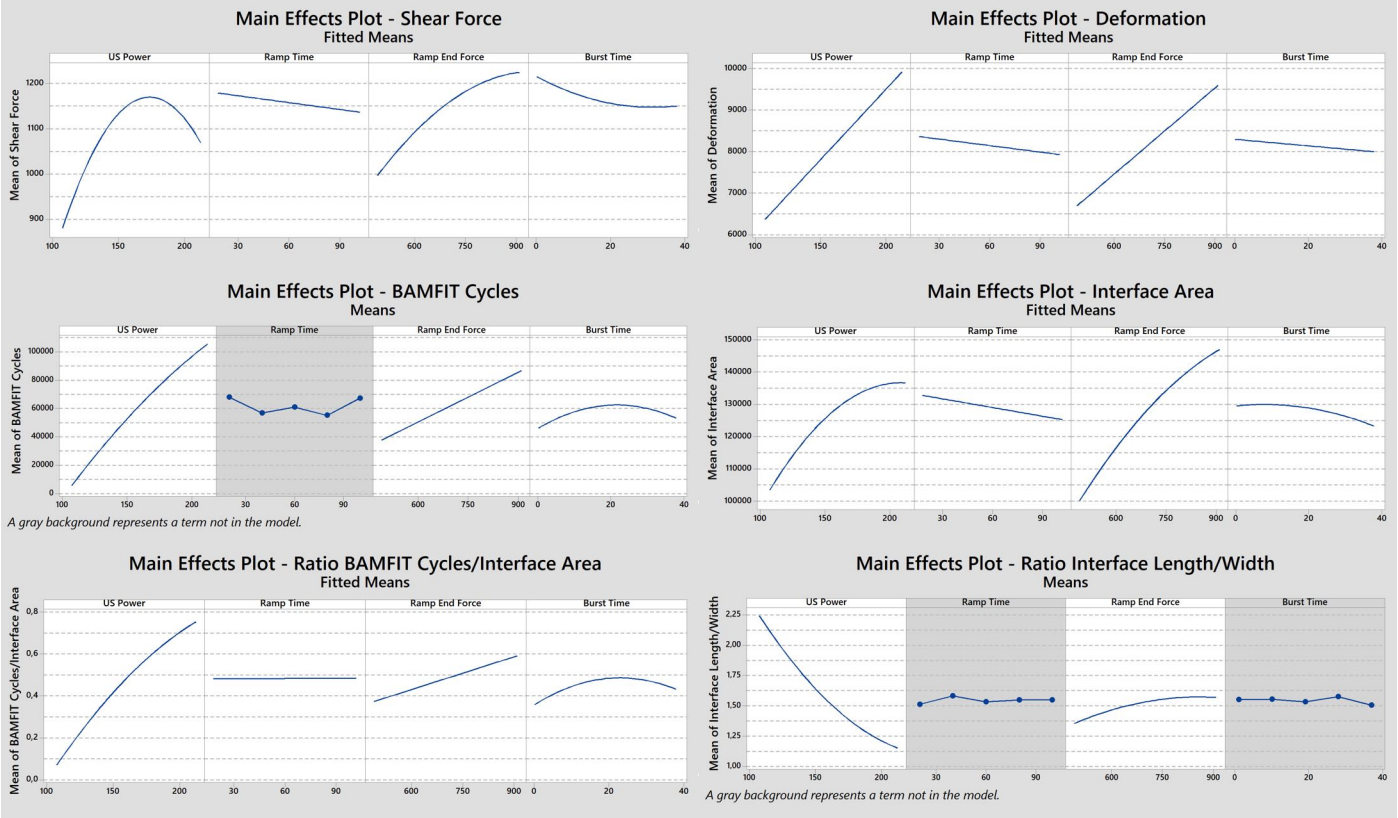

Abbildung 5: Haupteffektdiagramme für alle sechs ausgewerteten Zielgrößen (vorhandene Wechselwirkungen sind aus Platzgründen nicht dargestellt)

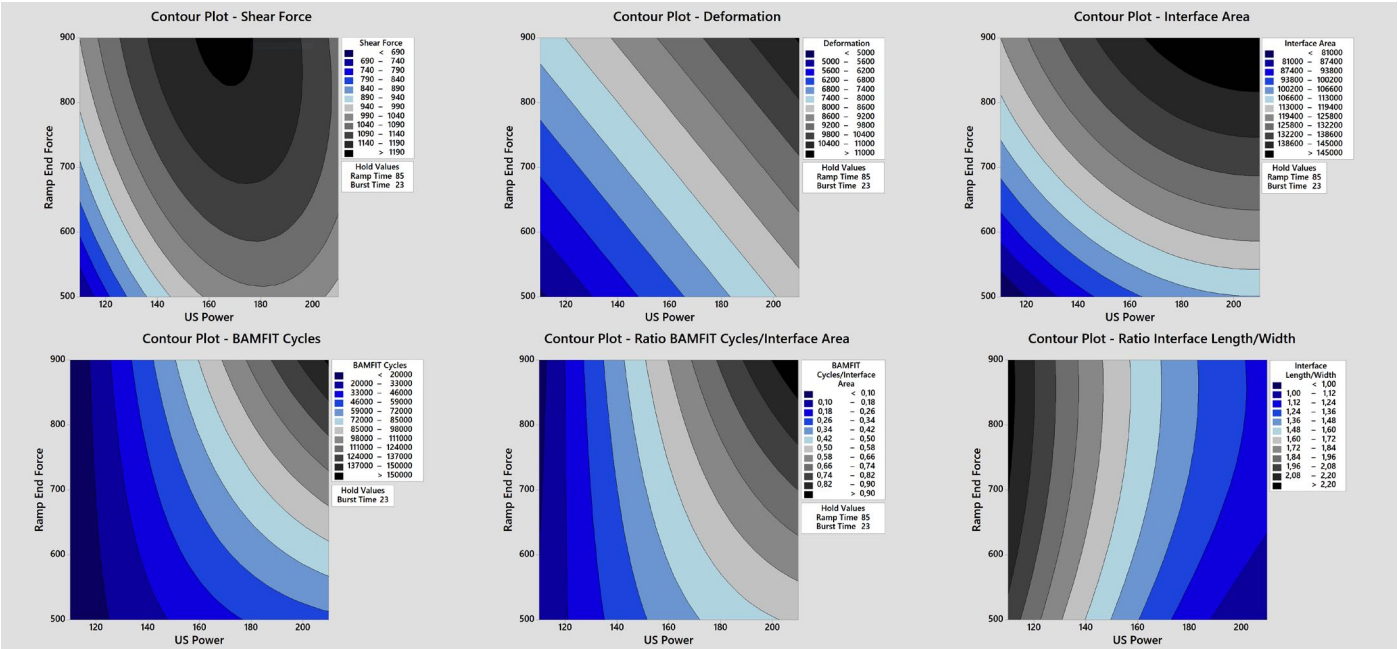

Abbildung 6: Konturdiagramm – am Beispiel US Power vs. Ramp End Force – für alle sechs ausgewählten Zielgrößen

dieser US Power bewirkt eine Änderung der Ramp End Force nur unwesentlich eine Erhöhung der BAMFIT Zykelzahl. Ab einer Einstellung der US Power von 160 digits und einer Ramp End Force von 700 cN steigt die BAMFIT Zykelzahl mit einer Parametererhöhung stetig an. Ihr Maximum liegt bei den höchsten Einstellungen für beide Parameter. Der BAMFIT-Test zeigt demnach nicht das Verhalten, welches der Schertest gezeigt hat. Die zunehmende Entfestigung des Drahtmaterials bei den höheren Bondparametereinstellungen hat offenbar keinen Einfluss auf den Test selber.

Da sich Interfacefläche und BAMFIT Zykelanzahl sehr ähnlich entwickeln, ist auch das Verhältnis aus beiden Werten bei hohen Bondparametereinstellung am höchsten und bei geringen Bondparametereinstellungen am niedrigsten. Um eine hohe BAMFIT Zykelzahl pro Interfacefläche zu erreichen, sollten also hohe Ramp End Force und hohe US Power gewählt werden. Unterhalb einer Schwelle von 160 digits für die US-Power liegen die Werte, unabhängig von der Ramp End Force, auf einem relativ niedrigen Niveau. Diese Parameterkombination sollte also eher vermieden werden.

Ebenfalls interessant ist die Entwicklung der Interfaceform bei verschiedenen Bondparametereinstellungen, die durch das Verhältnis aus Interfacelänge zu Interfacebreite beschrieben wird. Hier zeigt sich, dass die US Power erheblichen Einfluss darauf hat, ob die Interfacefläche eher rund oder elliptisch ausgebildet ist (vgl. Abbildung 4). Die Wahl der Ramp End Force ist für die Interfaceform eher nicht entscheidend. Wenn noch eine annähernd elliptische Form erreicht werden soll, darf für den untersuchten Prozess maximal eine US Power von ca. 140 digits gewählt werden. Diese führt zu einem Verhältnis von ca. 1,7-1,8 bei einer Ramp End Force von ca. 800 cN.

Zusammenfassung:

Welche Schlüsse lassen sich nun aus der vorgestellten Untersuchung ziehen? Zunächst wird deutlich, dass durch die Verwendung des BAMFIT Verfahrens neben einer zusätzlichen Messgröße, der BAMFIT Zykelanzahl, auch eine wesentlich detailliertere Analyse des Bondinterface bzw. der beim Bondvorgang verbundenen Bereiche möglich wird. Dies erlaubt eine Quantifizierung der verbundenen Fläche und damit einen direkten Rückschluss auf die Güte der Verbindung. Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe der Interfacefläche ein Formfaktor bestimmen, der darüber Auskunft gibt, ob das Interface eher rund oder elliptisch ausgeformt ist. Beim Vergleich der Entwicklung der Scherkräfte und der BAMFIT Zykelzahlen fällt deutlich auf, dass für die Scherkraft bei einer spezifischen Bondparametereinstellung (US Power ca. 165 digits, Ramp End Force ca. 900 cN) ein Maximum prognostiziert wird, während die BAMFIT Zykelzahlen stetig ansteigen. Dieser Sachverhalt bestätigt die häufig gemachte Beobachtung, dass der Schertest durch den Zustand des Bondkontaktes beeinflusst wird. Ist das Drahtmaterial sehr stark durch den wirkenden Ultraschall entfestigt worden, durchschneidet der Schermeißel diese Region bei geringerer Kraft. Es wird also nur noch das Drahtmaterial mechanisch getestet und nicht mehr die Verbindungszone (Interface). Beim BAMFIT Verfahren lässt sich dieser Effekt für den gewählten Versuchsaufbau nicht nachweisen. Das BAMFIT Verfahren testet also in jedem Fall den Zustand interfacenahen Verbindungsbildung, unabhängig davon, ob mit hohen oder niedrigen Bondparametereinstellungen gebondet wurde.

Das BAMFIT Verfahren soll die Zuverlässigkeit eines Drahtbondkontaktes im Active Power Cycling beschleunigt bewerten. Dieser Sachverhalt muss noch durch unabhängige Prüfungen durch die Industrie abgesichert werden. Sollte sich diese Tatsache eindeutig bestätigen, so zeigt dieser Applikationsbericht, dass sich das Testverfahren nahtlos in ein DoE zur Prozessoptimierung integrieren lässt.

Das Projekt SpeedCycle wird das BAMFIT-Verfahren für den industriellen Einsatz bewerten und die Korrelation zwischen Schertest und BAMFIT-Resultat umfangreich untersuchen.

Informationen zum Projekt SpeedCycle:

www.bond-iq.de/speedcycle

Seminare zum Drahtbonden, rund um Prozessoptimierung und Technologie unter:

www.bond-iq.de

Dieser Applikationsbericht der Bond-IQ entstand mit freundlicher Unterstützung des Fraunhofer IZM Berlin (Felix Fischer und Prof. Dr. Martin Schneider-Ramelow).

ENHANCE WIRE BONDING

www.bond-iq.de
+49 30 46069009
seminaranfrage@bond-iq.de