

# Optimierung des Drahtbondprozesses durch statistische Versuchsplanung



## Zuverlässige Verbindungen für Halbleiter in der Leistungselektronik

Stefanie Engelmann, ADDITIVE GmbH, in Zusammenarbeit mit Aaron Hutzler, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie IISB

### Projektziel

Durch die gestiegenen Anforderungen und veränderten Aufbautechnologien sind Drahtbonds zum Lebensdauer begrenzenden Faktor geworden. Der Bondprozess soll dahingehend optimiert werden, dass ein Ausfall des Bonddrahts durch zu starke Deformation oder durch ungewolltes Lösen der Verbindung zwischen Bonddraht und Halbleiter bzw. Schaltungsträger vermieden wird.

### Lösung

Zur Optimierung des Drahtbondprozesses untersucht das Fraunhofer IISB den genauen Einfluss der einzelnen Bondparameter, um eine gezielte Ermittlung der optimalen Faktorstufen zu ermöglichen und somit die Scherkraft zu maximieren, die als Maß für die Güte bzw. Festigkeit der Bondverbindung angesehen wird.

### Ergebnis

Mit der statistischen Versuchsplanung in Minitab ließen sich in kurzer Zeit weitreichende Kenntnisse über die Wirkung der Bondparameter auf die Scherfestigkeit der Bonddrähte gewinnen. Auf Basis der Ergebnisse wurde die durchschnittliche Scherkraft um rund 16 % gesteigert.

## Projektziel

In den vergangenen Jahren hat die Leistungselektronik einen immer höheren Stellenwert ge-

wonnen. Damit stehen Lebensduranforderungen und Kosteneffizienz im Fokus. Die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) spielt dabei eine zentrale Rolle, wobei neue Anforderungen an die verwendeten Materialien gestellt werden. Dies gilt insbesondere auch für das Drahtbenden als Verbindungstechnik zur oberseitigen Kontaktierung von Leistungshalbleitern. Durch den Einsatz einer geeigneten Software zur statistischen Versuchsplanung lässt sich dieser Drahtbondprozess optimieren.

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelemententechnologie (IISB) befasst sich in der Abteilung „Leistungselektronische Systeme“ unter anderem mit dem Aufbau von Leistungsmodulen für externe Kunden sowie auch für eigene Systeme. Für Standardaufbauten ist ein optimierter Drahtbondprozess wichtig, um reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Durch gezielte Variation der einzelnen Bondparameter kann dies erreicht werden. Schwerpunktmäßig beschäftigt sich dieser Geschäftsbereich mit Forschungsthemen zu innovativen Schaltungs- und Systemlösungen für hocheffiziente und kompakte Leistungswandler, mechatronische 3D-Integration, multifunktionale Integration, Einsatz neuer Materialien und Halbleiterbauelemente. Anwendungsfelder sind u.a. die elektrische Energieübertragung, Antriebstechnik, Schaltnetzteile und Spannungswandler, Komponenten für die Fahrzeugtechnik und Fahrzeugmodelle; darüber hinaus aber auch Aufbau und Verbindungstechnik für passive und aktive Bauelemente und Lebensdauer- sowie Zuverlässigkeitsun-

tersuchungen für den Bereich Leistungselektronik.

Durch die gestiegenen Anforderungen und veränderten Aufbautechnologien sind die Drahtbonds zum Lebensdauer begrenzenden Faktor geworden. Bei Temperaturwechselbelastungen wirken auf die Bondverbindungen enorme mechanische Spannungen. Dabei sind zwei unterschiedliche Ausfallarten zu unterscheiden:

Beim Heel-Crack-Ausfall kommt es durch fortschreitende Werkstoffermüdung und Rissbildung an der Ferse des Bondfußes zum Abriss des Bonddrahts. Dies wird häufig durch eine Vorschädigung des Bonddrahts während des Bondprozesses hervorgerufen, da durch das Anpressen des Drahts auf das Substrat eine Verformung unvermeidbar ist.

Beim Bondwire-Liftoff löst sich durch einen Riss an der Grenzfläche zwischen Draht und Halbleitermaterial der gesamte Bonddraht von der Halbleiterchip-Metallisierung ab. Hier sind die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien die Hauptausfallursache.

Der Bondprozess soll folglich dahingehend optimiert werden, dass der Bonddraht während des Bondvorgangs nicht derart stark deformiert werden darf, dass Heel-Crack-Ausfälle provoziert werden und dass die Verbindung zwischen Bonddraht und Halbleiter bzw. Schaltungsträger eine möglichst hohe Festigkeit besitzt, um den Bondwire-Liftoff-Ausfall zu vermeiden. Als Maß für die Festigkeit oder Güte der Bondverbindung wird hierbei die Scherkraft angesehen, die notwendig ist, um den Draht vom Halbleiter zu lösen.

## Lösung

### Durch gezielte Ermittlung optimaler Faktorstufen die Scherkraft maximieren

Bislang wurden die vom Bonddraht-Hersteller empfohlenen Standardeinstellungen für den Fügeprozess verwendet. Durch die Notwendig-

keit der Optimierung des Drahtbondprozesses untersucht das Fraunhofer IISB den genauen Einfluss der einzelnen Bondparameter, um eine gezielte Ermittlung der optimalen Faktorstufen zu ermöglichen und somit die Scherkraft zu maximieren. Zur Bestimmung der günstigsten Bondparametereinstellungen verwendet das Institut eine statistische Versuchsplanung mit Hilfe der Software Minitab. Zunächst werden Trennschärfe bzw. nötige Replikationen für einen vollfaktoriellen Versuchsplan mit Hilfe der Standardabweichung von vorangegangenen Schertests ermittelt. Dabei ist die Zielgröße immer die Scherfestigkeit der Bonddrähte.

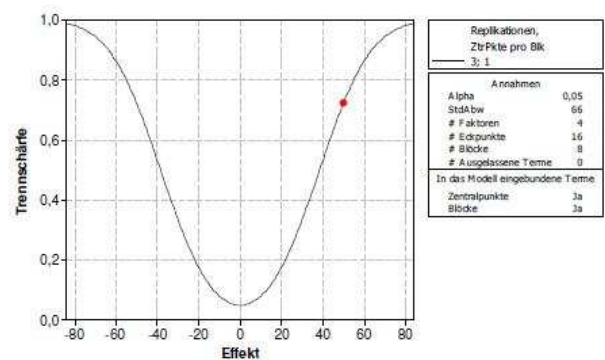


Abbildung 1: Trennschärfekurve aus Minitab

Es lässt sich beobachten, dass drei Replikationen für einen vollfaktoriellen Versuchsplan ausreichend sind, um entsprechende Effekte zu erkennen. Dabei hält sich der Versuchsaufwand mit 56 Versuchen noch in Grenzen. Der vollfaktorielle Versuchsplan ergibt einen signifikanten Einfluss der Faktoren Bondkraft, Ultraschallkraft und -zeit.

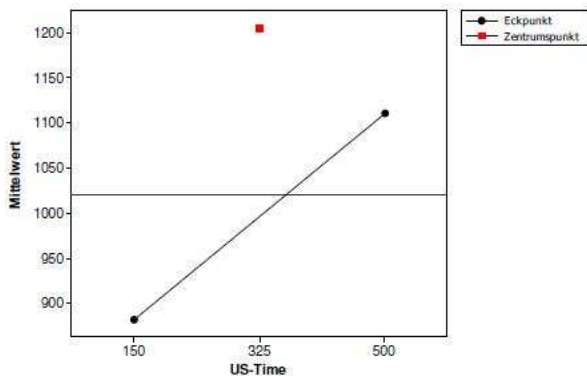


Abbildung 2: Haupteffektediagramm aus Minitab

Das Haupteffektediagramm aus Minitab zeigt den Einfluss der Ultraschallzeit (US-Time): Mit längerer Dauer wird der Wert der Scherkraft verbessert, jedoch liegt das Maximum zwischen 150 und 500 ms und ist vom Versuchsplan nicht darstellbar, da nur lineare Zusammenhänge aufgelöst werden können. Dies ist ein Hinweis darauf, dass zusätzlich ein Wirkungsflächenversuchsplan notwendig ist, um den realen Einfluss der Parameter erkennen zu können.

Die Versuchsauswertung bzw. die Varianzanalyse deuten außerdem darauf hin, dass ein Modell höherer Ordnung verwendet werden muss. Die entsprechenden Daten wurden direkt aus der Statistik-Software entnommen. Die fehlende Anpassung ist mit einem p-Wert von 0,001 signifikant und untermauert die nötige Erweiterung des Versuchsplans mit Sternpunkten zu einem Wirkungsflächenversuchsplan. Der R<sup>2</sup>-Wert (R-Qd) ist mit 98,52 % ideal, weshalb keine Veränderungen oder zusätzlichen Replikationen vorgenommen werden.

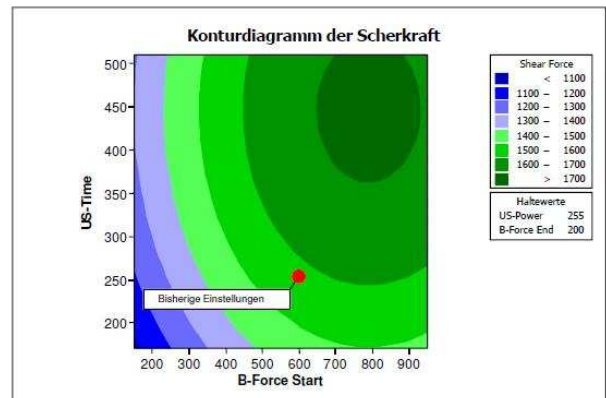


Abbildung 3: Konturdiagramm aus Minitab

Das Konturdiagramm aus Minitab zeigt das Ergebnis des Wirkungsflächenversuchsplans für die Parameter Ultraschallzeit und Bondkraft (B-Force). Die fehlende Anpassung des Wirkungsflächenplans hat im Gegensatz zu der des vollfaktoriellen Versuchsplans einen p-Wert von 0,233 und zeigt damit, dass kein weiteres Modell höherer Ordnung notwendig ist, um den Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgröße darzustellen. Dies wurde zusätzlich mit einem R<sup>2</sup>-Wert von 97,27 % bestätigt.

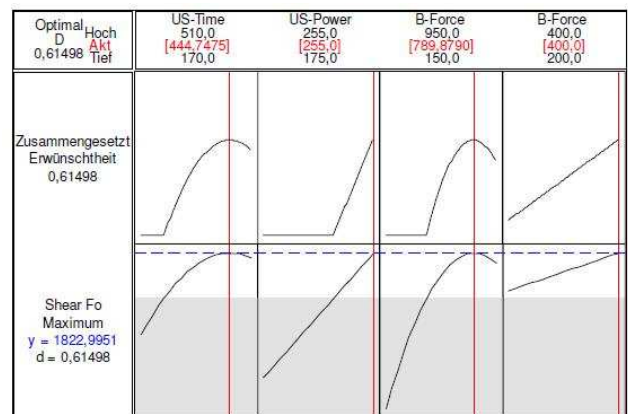


Abbildung 4: Zielgrößenoptimierung aus Minitab

Mit der Zielgrößenoptimierung aus Minitab können alle Faktoren variiert und der durch das Modell prognostizierte Wert der Scherkraft (y=1822 cN) berechnet werden. Die Güte des Modells wurde mit der Zielgrößenoptimierung überprüft.

## Ergebnis

### **Statistische Versuchsplanung liefert schnell weitreichende Kenntnisse**

Aus früheren Tests ergab sich für die bisherigen Einstellungen ein Mittelwert der Scherfestigkeit von 1568 cN (bei einer Standardabweichung von 66 cN) und der Median lag bei 1575 cN. Die Zielgrößenoptimierung sagt für diese Einstellung einen Wert von 1576 cN voraus. Dies bestätigt wiederum, dass der Versuchsplan bzw. dessen Auswertung eine sehr gute Qualität hat, da die besagten Parametereinstellungen zwar im Versuchsraum liegen, jedoch keine Faktorstufe mit dieser Einstellung getestet wurde. Der Wirkungsflächen-Versuchsplan, welcher nichtlineare Effekte berücksichtigt, liefert ein Ergebnis der Scherkraft von 1822 cN. Die Verbesserung von 1576 cN auf 1822 cN entspricht einer Erhöhung der Scherkraft um ca. 16%. Die für 1822 cN notwendigen Parametereinstellungen wurden anschließend überprüft und das Ergebnis von durchschnittlich 1822 cN konnte bestätigt werden.

Mit der statistischen Versuchsplanung mit Minitab ließen sich in kurzer Zeit weitreichende Kenntnisse über die Wirkung der Bondparameter auf die Scherfestigkeit der Bonddrähte gewinnen. Die errechneten Modelle wurden entsprechend auf Plausibilität geprüft und es konnte eine hohe Güte und Verlässlichkeit festgestellt werden. Auf Basis der Ergebnisse wurde die durchschnittliche Scherkraft um rund 16 % gesteigert. Die Erweiterung des anfangs durchgeführten vollfaktoriellen Versuchsplans durch einen Wirkungsflächenplan erwies sich als notwendig, da dadurch der nichtlineare Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgröße, d.h. Bondparametern und Scherkraft, dargestellt werden konnte.

Die neu ermittelten Bondparameter werden für alle zukünftigen Bondaufträge verwendet. Bei neuen Materialpaarungen wird zunächst wieder ein entsprechender Versuchsplan durchgeführt und das gefundene Optimum in einer Datenbank hinterlegt.



ADDITIVE Soft- und Hardware  
für Technik und Wissenschaft GmbH

Max-Planck-Str. 22 b  
D-61381 Friedrichsdorf/Ts.

Telefon: +49 (0)61 72-59 05-0  
Fax: +49 (0)61 72-77 613  
E-Mail: [info@additive-net.de](mailto:info@additive-net.de)  
Internet: <http://www.additive-net.de/software>

Die ADDITIVE GmbH ist ein Systemhaus, das Produkte und Dienstleistungen für technische, wissenschaftliche Anwendungen bietet. Mit zirka 45 hochqualifizierten Mitarbeitern aus unterschiedlichen Ingenieurdisziplinen, aufgeteilt in drei Geschäftsbereiche - SOFTWARE, IT-SERVICE und ACADEMY -, schaffen wir mit Ihnen zusammen einen Mehrwert für Ihre Anwendungen.

ADDITIVE wurde 1989 gegründet und hat seinen Firmensitz in Friedrichsdorf am Rande des Taunus. Durch die Nähe zu Frankfurt am Main sind wir in Deutschland wie auch international schnell bei Ihren Anwendungen vor Ort.

Die Kernkompetenzen von ADDITIVE liegen im Bereich der Datenerfassung/-analyse und Datenvisualisierung, Software für Mathematik und Statistik, Software für das statistische Qualitätsmanagement sowie Software für Chemie und Life Science und webbasierten Anwendungen.

ADDITIVE vermarktet Standardprodukte technisch führender Hersteller und ergänzt diese mit umfangreichen Ingenieurdienstleistungen. Diese reichen von der Beratung und dem Verkauf inklusive Pre- und After-Sales-Service bis hin zu kunden- und anwendungsspezifischen Erweiterungen, Systemintegration, Inbetriebnahme, Schulungen u.v.m.

ADDITIVE-Kunden finden sich in allen Branchen wieder, wie z. B. Finance, Automotive, Aerospace, Engineering, Pharma und IT-Services, der kompletten deutschen Forschungslandschaft und allen akademischen Institutionen.



Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und  
Bauelementetechnologie IISB

Schottkystraße 10  
D-91058 Erlangen

E-Mail: [aaron.hutzler@iisb.fraunhofer.de](mailto:aaron.hutzler@iisb.fraunhofer.de)  
Internet: <http://www.iisb.fraunhofer.de>

Das 1985 gegründete Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB betreibt angewandte Forschung und Entwicklung auf den Gebieten Leistungselektronik, Mechatronik, Mikro- und Nanoelektronik. Mit seinen Arbeiten zu leistungselektronischen Systemen für Energieeffizienz, Hybrid- und Elektroautomobile sowie zur Technologie-, Geräte- und Materialentwicklungen für die Nanoelektronik genießt das Institut internationale Aufmerksamkeit und Anerkennung.

Im Geschäftsfeld "Leistungselektronische Systeme" werden schwerpunktmäßig Themen wie innovative Schaltungs- und Systemlösungen für hoch-effiziente und kompakte Leistungswandler, mechatronische 3D-Integration, multifunktionale Integration, Einsatz neuer Materialien und Halbleiterbauelemente vorangetrieben. Anwendungsfelder sind u.a. die elektrische Energieübertragung, Antriebstechnik, Schaltnetzteile und Spannungswandler, Komponenten für die Fahrzeugtechnik und Fahrzeugmodelle sowie Aufbau und Verbindungstechnik für passive und aktive Leistungsmodul sowie Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen. Das Fraunhofer IISB verfügt darüber hinaus über umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Fehleranalyse. Dies gilt für alle Ebenen elektronischer Schaltungen, vom Chip über Chipkontaktierung, Gehäuse und Schaltungsträger (Isoliersubstrate) bis hin zu passiven Bauelementen.

Rund 180 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in der Vertragsforschung für die Industrie und öffentliche Einrichtungen. Neben seinem Hauptsitz in Erlangen hat das IISB zwei weitere Standorte in Nürnberg und Freiberg. Das IISB kooperiert eng mit dem Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.