

Zuverlässiges Design von Aluminiumdickdrahtbonds bei Temperaturwechselbelastung von Steuergeräten mit Gehäusen aus glasfaserverstärktem Kunststoff am Beispiel ESP

Markus Rauch^{1*}

¹ Automotive Electronics, Robert Bosch GmbH, Reutlingen

Zusammenfassung

Das Elektronische Stabilitäts-Programm (ESP) liefert einen wesentlichen Beitrag zur Fahrzeugsicherheit im Bereich Fahrdynamik. Die Sicherheitsrelevanz dieses Systems erfordert ein hohes Maß an Zuverlässigkeit.

Aufgrund des häufig motornahen Anbaus ist das Steuergerät des Systems hohen Umweltbelastungen ausgesetzt. So ist, bedingt durch hohe Temperaturbelastung, die zuverlässige thermomechanische Auslegung des Steuergeräts von zentraler Bedeutung.

Insbesondere durch die komplexe Verformung geklebter, glasfaserverstärkter Kunststoffgehäuse in Kombination mit Werkstoffen mit deutlich abweichender thermischer Ausdehnung (Kunststoffe, Keramik, Metall, etc.) kommt es zu mechanischen Belastungen der Bauelemente sowie der Elemente der Aufbau- und Verbindungstechnik.

Aluminiumdickdrahtbonds, die zur Verbindung der elektronischen Schaltung mit elektrischen Komponenten von z.B. Magnetspulen und Steckerpins verwendet werden, stehen aufgrund der möglichen elastisch-plastischen Verformung besonders im Fokus.

Der Vortrag zeigt die systematische Vorgehensweise, wie die Verformung durch den Klebeprozess sowie die thermische Verformung des glasfaserverstärkten Kunststoffgehäuses mittels Optimierungsverfahren an die gemessene Ver-

* Kontakt: Dr.-Ing. Markus Rauch, Robert Bosch GmbH, AE/EDS-A10, Markwiesenstraße 46, D-72770 Reutlingen-Kusterdingen, E-Mail: markus.rauch@de.bosch.com

formung angepasst wird. Anschließend wird das Temperaturlastkollektiv durch FE-Berechnungen des Steuergeräts auf lokale Belastungskollektive einzelner Bonds umgerechnet.

Mittels elastisch-plastischer FE-Berechnung von Bondsubmodellen und unter Verwendung eines geometrieunabhängigen Lebensdauermodells für Aluminiumdickdrahtbonds wird die Geometrie des jeweiligen Bondloops optimiert, um die geforderte Lebensdauer sicher zu erreichen.

Somit steht eine Vorgehensweise zur Verfügung, um die Zuverlässigkeit von Bondverbindungen in der Frühphase des Entwicklungsprozesses zu gestalten.

Keywords: Geometrieoptimierung, Zuverlässigkeitsbewertung, Elektronisches Steuergerät, Elastisch-plastische FE-Simulation, Aluminiumdickdrahtbond, Thermomechanische Belastung

1 Einleitung

Das Elektronische Stabilitäts-Programm (ESP) leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit. Dabei wird durch Verknüpfung der Funktionen ABS und ASR mit den kinematischen Daten des Fahrzeugs die Stabilisierung des Kraftfahrzeugs in Grenzsituationen stabilisiert und ungewolltem Ausbrechen und Schleudern entgegengewirkt. Das ESP-System besteht einerseits aus einem Hydroaggregat, das sowohl die Bremskraft unterbrechen (z.B. bei ABS-Manöver) als auch aktiv Bremskraft gezielt an den einzelnen Rädern aufbauen kann, siehe Abbildung 1.1. Den zweiten Teil des ESP-Systems bildet das elektronische Steuergerät, das die Vielzahl an Sensorsignalen (Lenkradwinkel, Beschleunigung, Drehrate, Raddrehzahl, Fahrpedal, Vordruck, etc.) bewertet und über Spulen die Magnetventile des Hydroaggregats steuert. Darüber hinaus kann, z.B. über die Kommunikation mit dem Motormanagement, das Motordrehmoment und damit die Antriebsschlupfwerte an den Rädern beeinflusst werden.

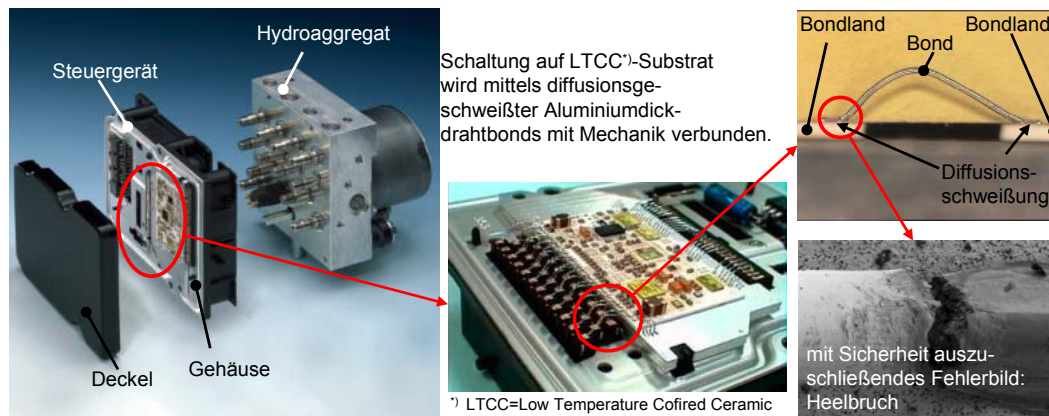


Abbildung 1.1: Aufbau ESP-System mit Verbindung von elektronischer Schaltung und Steuergerätemechanik durch Aluminiumdickdrahtbonds

Das in Abbildung 1.1 dargestellte ESP-Steuergerät besteht aus einem Mechanik-Teil (Stecker, Magnetspulen, Aluminiumplatte für Entwärmung, usw.) und der elektronischen Schaltung in Hybridbauweise auf Keramiksubstrat (Low Temperature Cofired Ceramic), welche sich bei motornahem Anbau durch eine hohe Robustheit auszeichnet.

Die Verbindung zwischen Schaltung und Steuergerätemechanik wird mit Hilfe von Aluminiumdickdrahtbonds über Diffusionsschweißung der jeweiligen Bondheels auf den Bondlands realisiert.

Das Steuergerät wird in der Regel im Motorraum verbaut und unterliegt daher neben Umweltbelastungen (z.B. Korrosionsangriff durch Salzwasser oder Industriegase) hauptsächlich Temperaturwechselbelastungen aufgrund Motorraumwärme und überlagerter Eigenerwärmung durch Schaltungsverlustleistung. Darüber hinaus stellen Karosserieschwingungen und Vibrationsbelastungen aus Eigenanregung durch das Hydroaggregat weitere mechanische Belastungen dar. Die Verwendung von Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdeh-

nungskoeffizienten bedingt Relativverschiebungen der beiden Bondlands. Aufgrund der Temperaturwechselbelastung kommt es daher zu signifikanten Beanspruchungen der Bonds, deren Versagen durch Ermüdungsbruch sicher ausgeschlossen werden muss. Die Berechnung und Bewertung von Aluminiumdickdrahtbonds steht im Folgenden im Fokus.

2 Thermische Verformung des Steuergeräts

Die Verschiebung der Bondlands stellt die Belastung für die einzelnen Bonds dar. Daher ist die korrekte Berechnung der thermischen Verformung des Steuergeräts notwendige Voraussetzung für eine Zuverlässigkeitsbewertung der Bonds. Hierbei stellt die Verwendung von kurzfaserverstärktem Thermoplast (PBT GF30), aufgrund der spritzgussbedingten, lokal unterschiedlichen Anisotropie des Werkstoffverhaltens, eine Schwierigkeit dar. Prinzipiell kann zunächst eine Spritzgussimulation durchgeführt und die Ergebnisse auf das strukturmechanische Modell übertragen werden. Allerdings hat sich durch den Vergleich mit thermischen Verformungsmessungen von Steuergerätegehäusen gezeigt, dass die Genauigkeit dieser Simulationskette derzeit noch nicht ausreicht, um die Bondlandverschiebungen korrekt zu berechnen.

Daher wurde im vorliegenden Fall ein anderer Weg eingeschlagen, der in Abbildung 2.1 am Beispiel des Steuergerätedeckels schematisch erläutert ist. Zunächst wird das geometrische Modell des Deckels in die zwei Bereiche eingeteilt, in denen laut Spritzgussimulation stark unterschiedliche Faserorientierung vorliegt. Für komplexere Geometrien, wie z.B. das Steuergerätegehäuse, können dabei deutlich mehr Unterteilungen vorgenommen werden. Dabei orientiert sich die Wahl des lokalen Koordinatensystems ebenfalls an der Faserorientierung (Deckelfläche = zylindrisch, Deckelrand = kartesisch). Anschließend wird eine strukturmechanische Finite Elemente Simulation durchgeführt.

Die zweite Eingangsgröße stellen thermische Verformungsmessungen an dem Deckel bei unterschiedlichen Temperaturen dar. Durch Minimierung der quadratischen Abweichung der gemessenen und berechneten Verschiebungen an mehreren Positionen des Deckels wird die Optimierung der orthotropen Werkstoffparameter so vorgenommen, dass die reale Verformung möglichst gut wiedergegeben wird.

Zur Optimierung mittels evolutionärem Algorithmus wird eine Kopplung von ANSYS®-APDL und optiSLang® (Fa. dynardo) verwendet, was den Vorteil bietet, das globale Optimum im Lösungsraum unter mehreren lokalen Optima zu finden.

Bei dem hier betrachteten ESP-Steuergerät wird neben dem Deckel auch das vormontierte Gehäuse (Gehäuse aus PBT GF30, Stanzgitter mit Magnetspulen und Steckerkontakten, sowie die aufgeklebte Aluminiumplatte zur Entwärmung) hinsichtlich thermischer Verformung optimiert.

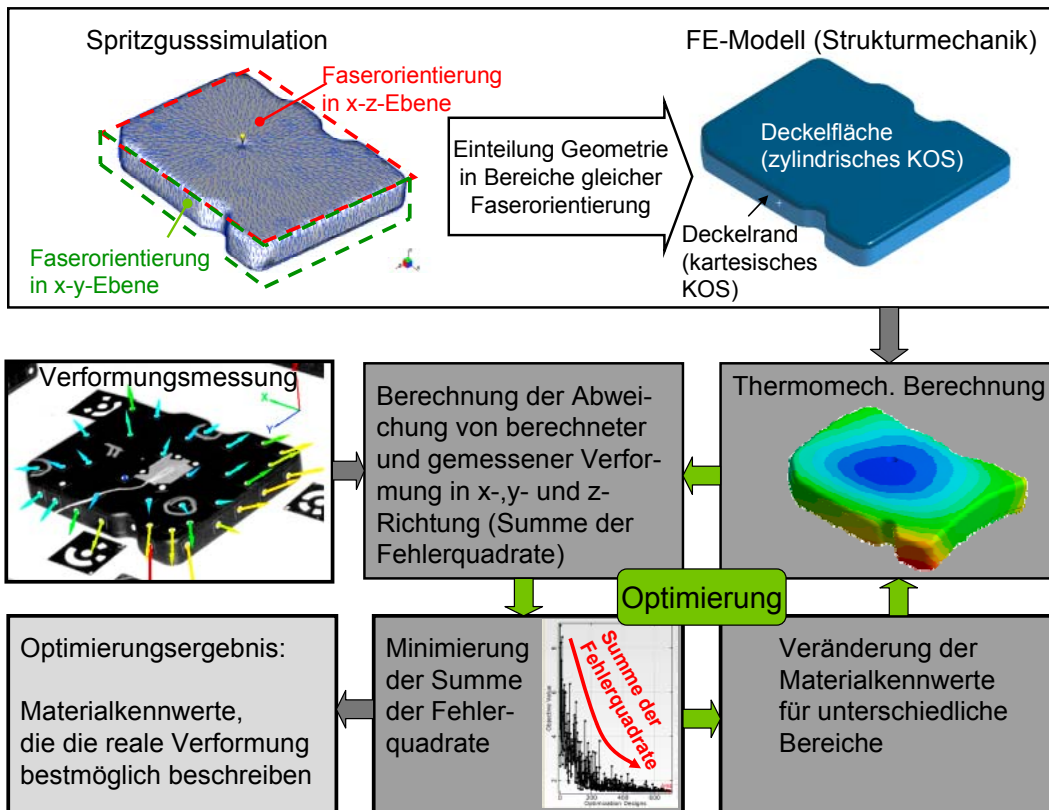


Abbildung 2.1: Ablauf der Optimierung der orthotropen Materialparameter zur bestmöglichen simulativen Beschreibung der thermischen Verformung des Steuergerätedeckels

Wie beim Deckel wird zur Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens des Thermoplasts (u.a. wegen Glasübergangstemperatur T_g) die Anpassung der Werkstoffparameter bei vier Temperaturen vorgenommen, siehe Abbildung 2.2.

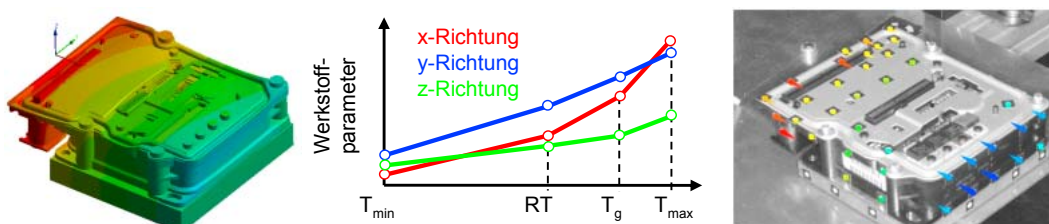


Abbildung 2.2: Berechnete und gemessene Gesamtverformung des vormontierten Gehäuses sowie schematische Darstellung der temperatur- und richtungsabhängig angepassten Werkstoffparameter für einen Bereich angenommener gleicher Glasfaserorientierung

Durch die temperaturabhängigen Werkstoffparameter kann eine korrekte Umwertung eines am Steuergerät angreifenden Temperaturlastkollektivs mit variierenden Hüben in lokale Bondlandverschiebungen erfolgen. Allerdings ist dazu auch die Berücksichtigung der Vorspannung des Steuergeräts durch die Verklebung von Deckel und vormontiertem Gehäuse notwendig. Der Ablauf der gesamten ther-

momechanischen Simulation nach erfolgter Anpassung der richtungsabhängigen Werkstoffparameter ist dazu in Abbildung 2.3 dargestellt.

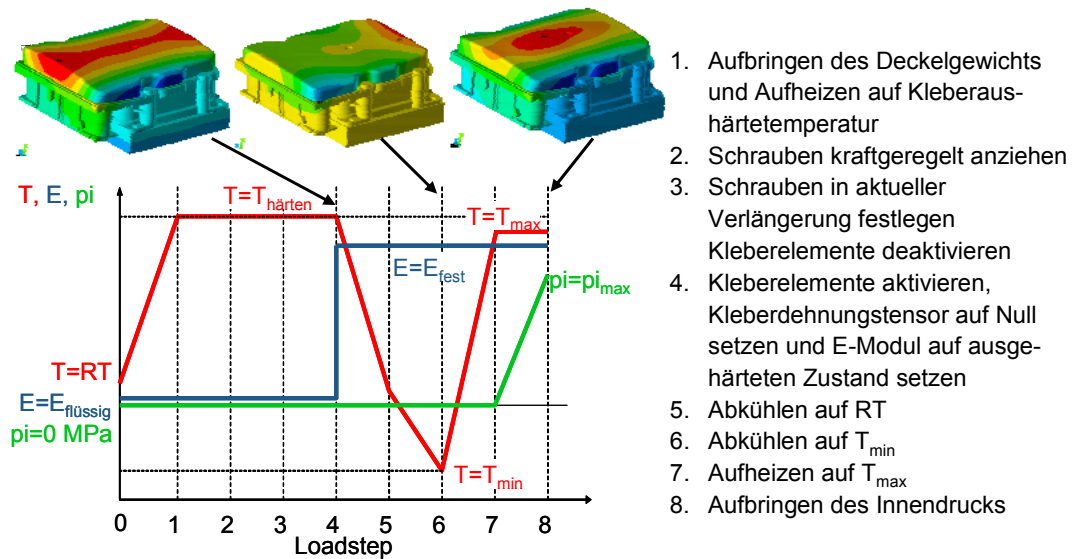


Abbildung 2.3: Ablauf der thermomechanischen Simulation des Steuergeräts inklusive Aushärteprozess bei der Deckelklebung

Zunächst kann sich der im „flüssigen“ Klebstoff mit geringer Steifigkeit $E_{flüssig}$ liegende Deckel bis auf reibungsbehaftete Kontakte an zwei Führungszapfen während des Aufheizens auf Aushärtetemperatur $T_{härten}$ frei ausdehnen. Nach Einstellen der Spannungsfreiheit des Klebers bei dieser Temperatur und Zuweisung der mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Klebers, wird auf Raumtemperatur abgekühlt. Von diesem vorgespannten Zustand aus beginnt nun die eigentliche Simulation eines Temperaturbelastungszyklus inklusive Berücksichtigung des zunehmenden Innendrucks bei Geräten ohne Druckausgleichselement (DAE).

3 Beanspruchungskollektiv des Bonds

Das am Steuergerät gemessene und klassierte Temperaturlastkollektiv wird für eine geraffte Erprobung überhöht und ist Basis für die Berechnung des an den einzelnen Bonds vorliegenden Beanspruchungskollektivs. Entsprechend Abbildung 3.1 wird zunächst die Verformung des Steuergeräts für die einzelnen Klassen des Temperaturkollektivs berechnet. Daraus kann für jeden Bond die Relativverschiebung der beiden Bondlands ermittelt und in das lokale Bondkoordinatensystem umgerechnet werden.

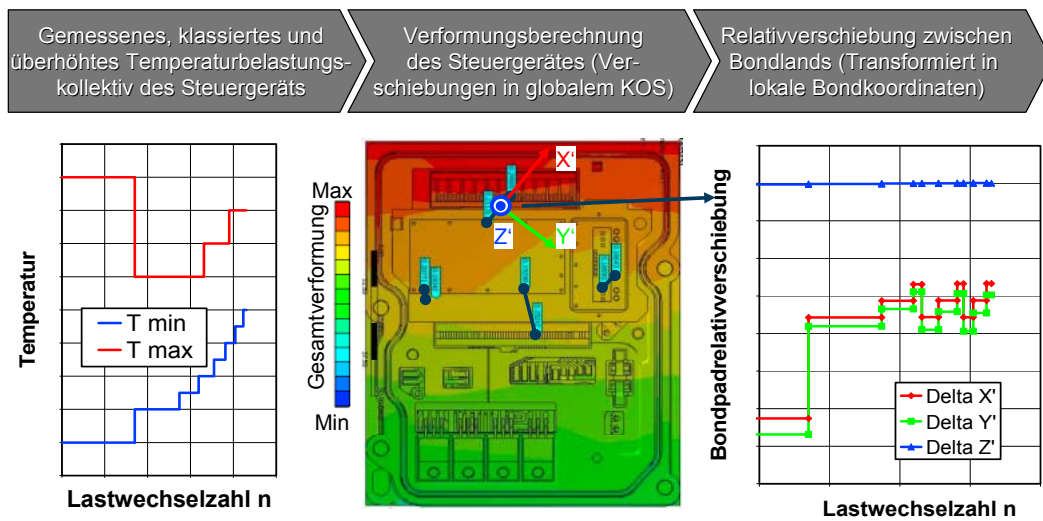


Abbildung 3.1: Umwertung des Temperaturlastkollektivs des Steuergeräts in das Verschiebungskollektiv eines Bonds in dessen lokalen Bondkoordinaten (X'-Richtung entspricht der Richtung des Bondloops)

Unter Verwendung eines parametrisierten FE-Modells des einzelnen Bonds, kann durch elastisch-plastische FE-Berechnung aus den Relativverschiebungen der beiden Bondlands ein Beanspruchungskollektiv (z.B. die plastische Vergleichsdehnung) abgeleitet werden, siehe Abbildung 3.2. Das nichtlineare Materialverhalten des Bonds wird durch eine aus LCF-Versuchen abgeleiteten zyklisch stabilisierten Fließkurve berücksichtigt.

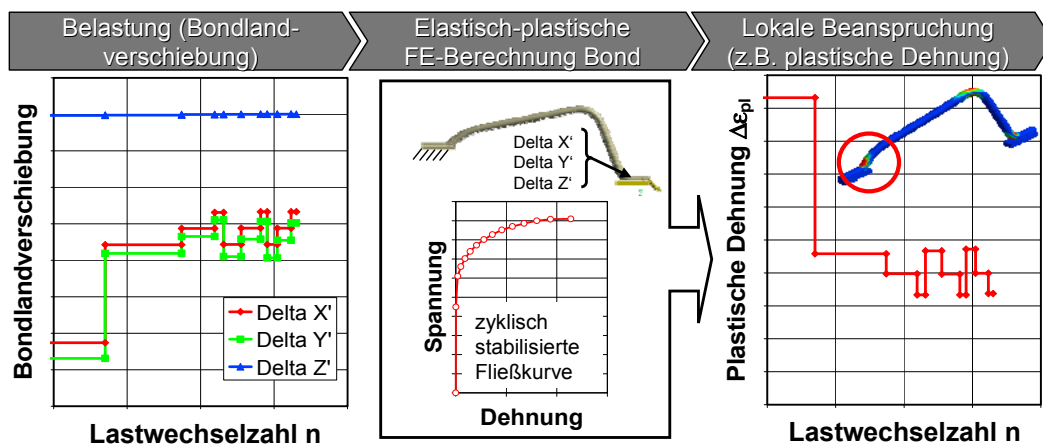


Abbildung 3.2: Berechnung des lokalen Beanspruchungskollektivs durch elastisch-plastisches FE-Modell eines Einzelbonds

4 Zuverlässigkeitsbewertung des Bonds

Um die lokal berechnete Beanspruchung in den einzelnen Bonds hinsichtlich Lebensdauer bewerten zu können, benötigt man eine geometrieunabhängige Be-

anspruchbarkeit. In Merkle (2008) ist die Erarbeitung eines Lebensdauerkonzepts für Aluminiumdickdrahtbonds erläutert. Zusammenfassend ist das Ergebnis in Abbildung 4.1 dargestellt.

Zunächst wurden mechanische Wöhlerversuche für unterschiedliche Bondgeometrien durchgeführt und statistisch ausgewertet (dargestellt sind die Werte für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63%). Dabei wurden u.a. der Drahtdurchmesser, die Looplänge, -höhe, Stufenhöhe und unterschiedliche Winkel zwischen Bond und Bondland variiert. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Bondmaschinen und die Fertigungsschwankungen einer einzelnen Bondmaschine sowie das Verhältnis von Mittellast und Lastamplitude verändert. Durch die elastisch-plastische Nachrechnung der Wöhlerversuche und Wahl eines geeigneten Schadensparameters ist es gelungen, eine geometrieunabhängige Beanspruchbarkeit abzuleiten. Diese stellt damit den Zusammenhang von Schwingbreite des plastischen Schadensparameters ΔS_{pl} und dabei ertragbarer Lastwechselzahl dar.

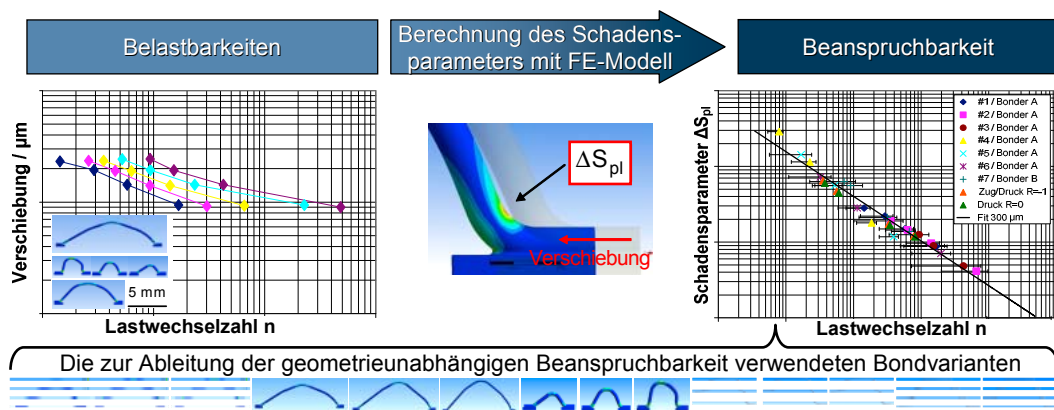


Abbildung 4.1: Ableitung einer geometrieunabhängigen Beanspruchbarkeit durch Kopplung von Wöhlerversuchen an Aluminiumdickdrahtbonds mit unterschiedlichen Geometrien und entsprechender elastisch-plastischer FE-Berechnungen

Die Zuverlässigkeitsbewertung des Bonds hinsichtlich Ermüdungsfestigkeit gegen das überhöhte Erprobungslastkollektiv erfolgt durch lineare Schadensakkumulation nach der elementaren Miner-Regel Haibach (1989), siehe Abbildung 4.2. Dabei wird für jede einzelne Lastklasse i des Kollektivs der Quotient aus auftretender (n_i) und ertragbarer Lastwechselzahl N_i gebildet. Die akkumulierte Schadenssumme D wird dann mit der charakteristischen Schadenssumme D_{Char} verglichen, welche durch Lebensdauerversuche für die Aluminiumdickdrahtbonds im Vorfeld anhand von Versuchen mit unterschiedlichen Lastkollektiven ermittelt wurde. Mit Versagen ist demnach für eine Schadenssumme zu rechnen, wenn D mindestens den Wert D_{Char} erreicht.

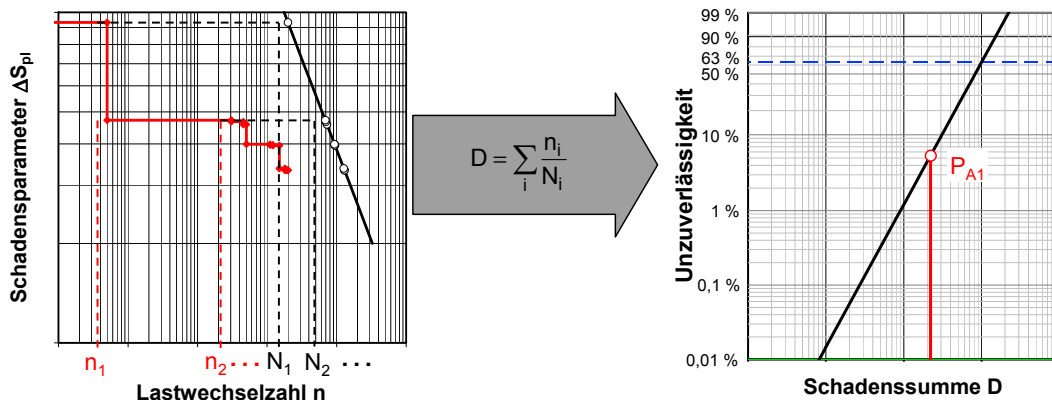


Abbildung 4.2: Lineare Schadensakkumulation und Zuverlässigkeitsbewertung bei Ermüdung der Ausgangsbondgeometrie für das überhöhte Erprobungstemperaturlastkollektiv

Die statistische Auswertung der Wöhlerversuche auf Basis von Weibullverteilungen erlaubt die Angabe der Zuverlässigkeit des Bonds aufgrund der berechneten bezogenen Schadenssumme für das überhöhte Erprobungsbelastungskollektiv. Diese liegt bei der zunächst ausgewählten, noch nicht optimierten, Bondgeometrie bei $R_1 = 1 - P_{A1}$. Diese Vorgehensweise ist Grundlage für die anschließende Optimierung der Bondgeometrie

5 Optimierung der Bondgeometrie hinsichtlich Zuverlässigkeit

Um ein grundsätzliches Verständnis hinsichtlich Einfluss unterschiedlicher Bondgeometrieparamter auf die Lebensdauer zu erlangen, wird zunächst eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die in Abbildung 5.1 dargestellten Eingangsparameter Loophöhe, Abstand des Loopmaximums, Radien im Bondheelbereich (R1 und R2) sowie die Winkel, mit denen der Bond von den Bondlands weggeführt wird (W1 und W2), werden variiert und elastisch-plastische FE-Berechnungen ausgewertet. Die Zielgröße stellt der plastische Schadensparameter ΔS_{pl} dar, direkt mit der Lebensdauer korreliert.

Den größten Schädigungsbeitrag liefern die großen Lastwechsel, die aus großen Temperaturhuben resultieren. Ist ein Bond für einen großen Lastwechsel optimiert, stellt dies auch für das gesamte Lastkollektiv ein Optimum dar. Daher wird zunächst die Sensitivitätsanalyse und anschließende Optimierung durch elastisch-plastische Berechnung von lediglich einem Lastwechsel ausgeführt.

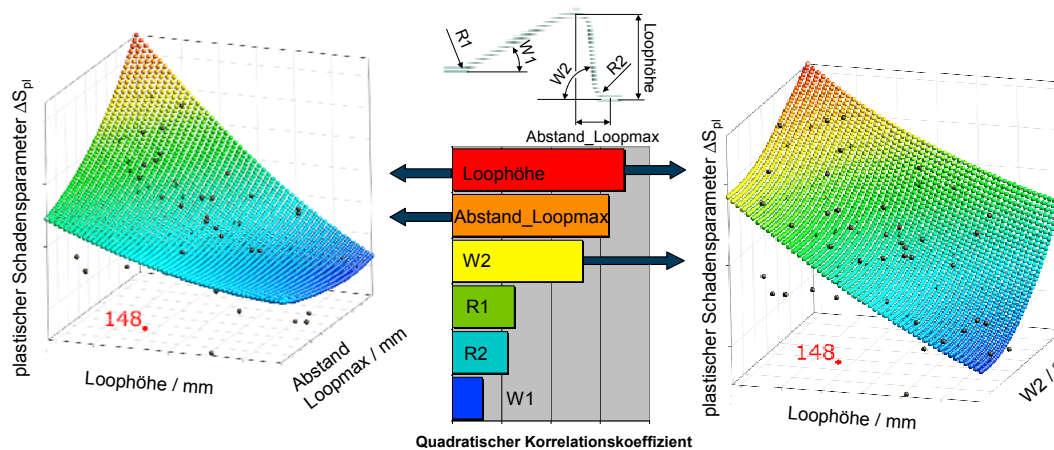


Abbildung 5.1: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse hinsichtlich Einfluss der variierten Bondgeometrieparameter auf den plastischen Schadensparameter und Approximationsflächen für die drei wichtigsten Einflussgrößen

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ist die Identifikation der drei wichtigsten Einflussgrößen auf die Lebensdauer bei der gegebenen Verschiebungsbelastung in X' -, Y' - und Z' -Richtung. Dabei stellt die Lage des Loopmaximums (Abstand und Höhe) die wirksamste Einflussgröße dar. Als weiteres Ergebnis der Sensitivitätsanalyse können über Approximationsflächen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Geometrieparametern und der Lebensdauer einfach dargestellt werden. Diese können bei der Konstruktion zur schnellen Vorauslegung von Bondloops herangezogen werden.

Um hinsichtlich Lebensdauer eine möglichst optimale Bondgeometrie zu erzielen, wird zunächst das Design als Startpunkt ausgewählt, das bei der Sensitivitätsanalyse den geringsten Schadensparameter bei den durch die Konstruktion zusätzlich geltenden Randbedingungen darstellt (hier: Design-Nr. 148). Diese Randbedingungen sind einerseits konstruktiv bedingt (begrenzte Bauraumhöhe erlaubt maximale Loophöhe). Andererseits können keine beliebig kleinen Radien gefertigt werden. Ausgehend von Design-Nr. 148 wird mit dieser Einschränkung die weitere Geometrieoptimierung durchgeführt.

Die Optimierung erfolgte mit einem evolutionärem Algorithmus durch Kopplung von ANSYS® Workbench und optiSLang®. Obwohl mit Design-Nr. 148 bereits ein Punkt bei einem lokalen Minimum vorlag, eignet sich hier kein Gradientenverfahren, da einzelne Designs aus geometrischen Gründen nicht aufgebaut werden können, wenn einzelne Parameter in Grenzbereiche kommen. Um mit diesen Designs ohne Ergebnis dennoch eine Optimierung durchführen zu können, sind evolutionäre Algorithmen gut geeignet.

In Abbildung 5.2 ist die Verringerung des plastischen Schadensparameters über den nacheinander gerechneten Geometrievarianten angegeben. Die bezogene Schadenssumme für die optimierte Geometrie ergibt eine Zuverlässigkeit von $R_2 = 1 - P_{A2}$, was eine Verbesserung um über eine Dekade darstellt.

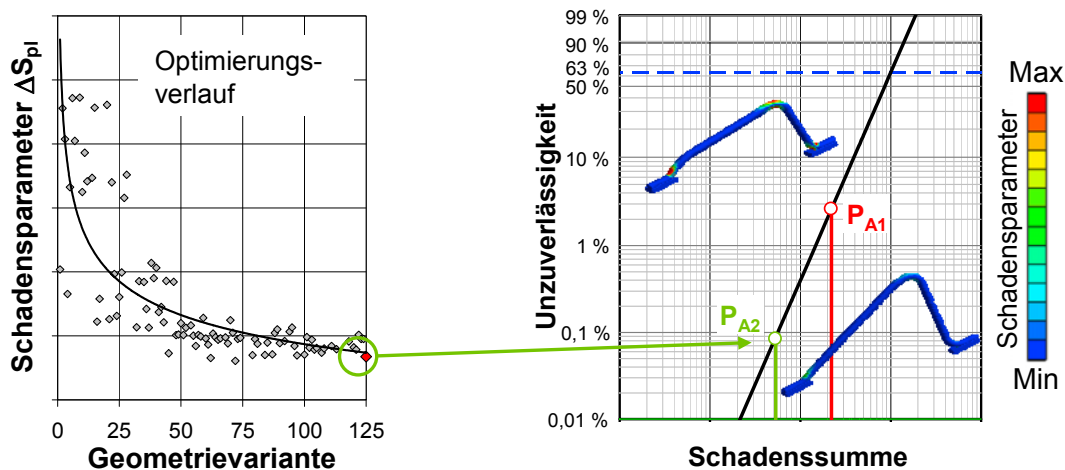


Abbildung 5.2: Optimierte Bondgeometrie und Zuverlässigkeitsbewertung für das überhöhte Erprobungslastkollektiv

6 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel von Aluminiumdickdrahtbonds wurde die systematische Vorgehensweise zur Optimierung hinsichtlich Zuverlässigkeit bei Temperaturwechselbelastung beschrieben. Es wurde gezeigt, wie durch Verwendung von Spritzgussimulationsergebnissen die glasfaserverstärkten Gehäuseteile unter Berücksichtigung gemessener thermischer Verformungen die thermomechanische Simulation des Gesamtsteuergeräts optimiert werden kann.

Sobald die Genauigkeit der Kopplung von Spritzgussimulation und strukturmechanischer Simulation ausreichend ist, kann auf die gemessene Verformung von faserverstärkten Kunststoffgehäusen verzichtet werden und das Gehäuse im Vorfeld ebenfalls in die Zuverlässigkeitsgestaltung einbezogen werden.

Darüber hinaus ist die hier vorgestellte Vorgehensweise auf beliebige Design- und Maschinenelemente übertragbar und als konsequentes Frontloading Basis für die Erzielung einer hohen Qualität des Erstentwurfs neuer Erzeugnisse. Ziel ist es damit, die Zuverlässigkeit für die kritischen Designelemente im Vorfeld bewerten und damit die Zuverlässigkeit des Gesamterzeugnisses gestalten zu können.

Literatur

MERKLE, L., ET AL.: Mechanical fatigue properties of heavy aluminium wire bonds for power applications. In: *Proceedings of the Electronics System-Integration Technology Conference ESTC-2008*, p. 1363-1367, Greenwich, London, UK, 2008

HAIBACH, E.: *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. Düsseldorf, Germany : VDI-Verlag, 1989