



**PRODUKTIONSINTEGRIERTE PRÜFUNG VON KLEBEVERBINDUNGEN**

# Drum prüfet, wie sich's bindet

Der Nachweis sicherer und zuverlässiger Klebeverbindungen fordert die zerstörungsfreie Prüfung besonders heraus. Mittels aktiver Thermografie und digitaler Shearografie ist es möglich, die Qualität von Klebeverbindungen bei Kupplungs-scheiben zu prüfen. In den Fertigungsprozess integriert, können so bis zu 60 Kupplungsscheiben pro Minute voll automati-siert geprüft werden.

**M**oderne Kraftfahrzeuge enthalten eine Vielzahl von Komponenten, an die höchste Anforderungen hinsichtlich der Funktionssicherheit gestellt werden. Durch das komplexe Zusammenspiel der Komponenten kön-

nen bereits kleinste Störungen bei einer dieser Komponenten zum Ausfall kompletter Systeme oder gar des gesamten Kraftfahrzeugs führen.

Ein Beispiel dafür ist die Kupplung des Fahrzeugs. Die in Fahrzeugkupplungen

**Wolfgang Schmidt, Tina Wilhelm und Alexander Verl, Stuttgart**

verwendeten Kupplungsscheiben müssen eine hohe Verschleißfestigkeit und wegen der entstehenden Reibungswärme eine hohe Temperaturfestigkeit aufweisen.

Kupplungsscheiben bestehen in der Regel aus einer Trägerscheibe und einem darauf aufgeklebten Reibbelag. Dabei muss ein einwandfreier Verbund zwischen Reibbelag und Trägerscheibe sichergestellt sein. Ein Versagen dieses Verbunds, beispielsweise kann sich der Reibbelag lokal infolge eines Haftungsfehlers von ▶

der Trägerscheibe ablösen, stellt keine Beeinträchtigung für den Reibschluss und die Primärfunktion der Kupplung dar.

Dieser Haftungsfehler kann jedoch zum Ausfall der kompletten Kupplung führen, falls der abgefallene Reibbelag einen Hydraulikkanal der Kupplung verschließt. Ein kleiner Produktionsfehler kann so zu erheblichem Schaden führen. Dies soll die Qualitätskontrolle der Verklebung von Reibbelag und Trägerscheibe vermeiden.

Da der Klebprozess eines industriellen Massenprodukts, wie einer Kupplungsscheibe, automatisiert erfolgt, genügen bereits leichte Abweichungen der Prozessparameter vom Optimum, um die Eigenschaften der Klebeverbindung negativ zu beeinflussen. Aus diesem Grund ist eine hundertprozentige Kontrolle der Verklebung anzustreben. Dabei muss das verwendete Verfahren folgenden Anforderungen genügen:

- zerstörungsfreies Prüfen,
- automatisierbare Auswertung,
- kurze Prüfzeiten (circa 1 bis 2 s),
- Reproduzierbarkeit,
- Kosteneffizienz,
- Flexibilität.

Konventionelle zerstörungsfreie Prüfverfahren stoßen meist hinsichtlich der Prüfzeiten und der Kosteneffizienz an ihre Grenzen. Moderne Verfahren wie die aktive Thermografie oder die digitale Shearografie hingegen erfüllen diese Anforderungen meist vollständig. Bei diesen bildgebenden Verfahren wird von außen aktiv Energie in das Prüfobjekt eingeleitet und anschließend die Antwort des Prüfobjekts auf diesen Energiefluss ausgewertet.

### Aktive Thermografie

Die Methode der aktiven Thermografie beruht auf dem Prinzip, dass im Werkstoff beziehungsweise Bauteil aktivierte Wärmeflüsse im Bereich von Inhomogenitäten ein singuläres, von der fehlerfreien Umgebung abweichendes Wärmefeld entwickeln. Dieses lässt sich durch thermografische Methoden präzise abbilden.

Die Energie kann dem Prüfobjekt unter anderem in Form von elektromagnetischen Wellen oder durch induktive Erwärmung zugeführt werden. Im Falle der Anregung durch Wärmestrahlung wird der Wärmefluss durch das Prüfobjekt hindurch analysiert.

Dabei gelten die Gesetze der Ausbreitung von Wellen. Trifft die Wärme auf ih-

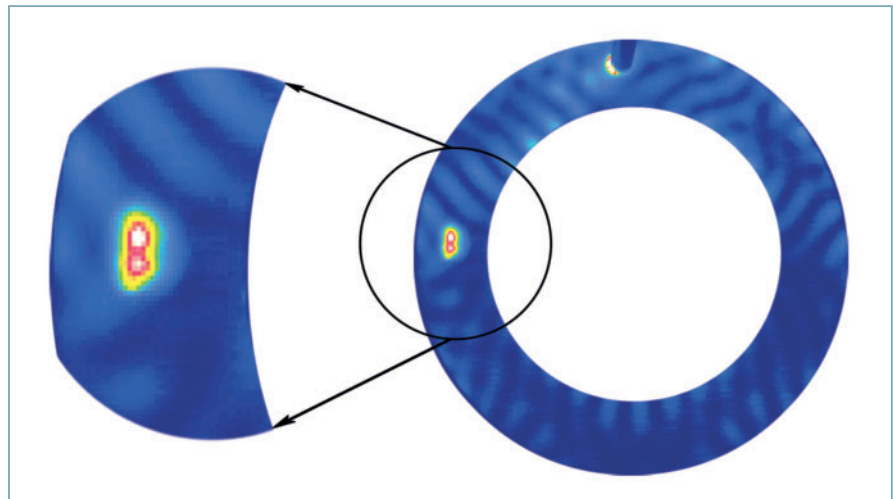


Bild 1. Wärmeentwicklung bei Delaminationen in der Verklebung, Nachweis mittels ultraschallangeregter Lockin-Thermografie

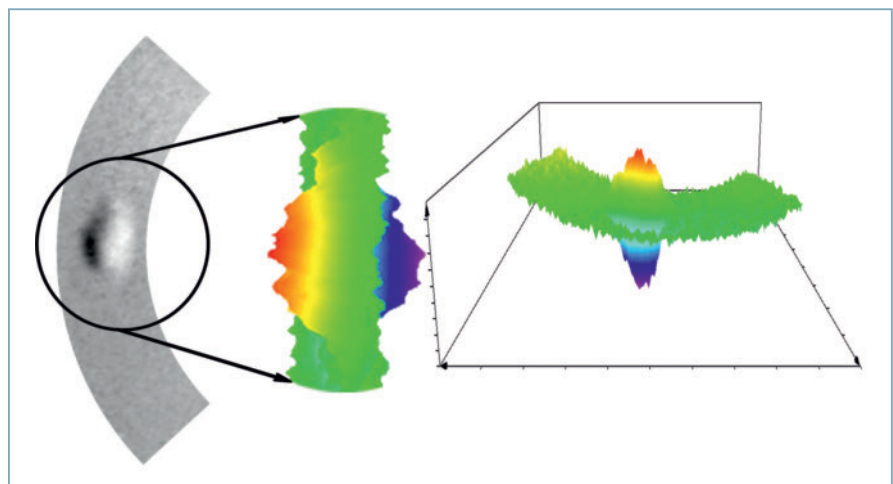


Bild 2. Nachweis von Haftungsfehlern in der Verklebung mittels Shearografie (links 2D-Graustufendarstellung, rechts 3D-Falschfarbendarstellung)

rem Weg durch das Objekt auf eine Grenzschicht zwischen zwei Materialien, finden dort Reflexionen statt, die zu einer lokalen Änderung des Temperaturfelds an der Bauteiloberfläche führen. Bei der induktiven Anregung erfolgt die Erwärmung durch im Prüfobjekt induzierte Wirbelströme. Liegt beispielsweise ein Riss innerhalb des Wirbelstromfelds, verdichten sich in diesem Bereich die Feldlinien, und es kommt zu einer Erwärmung.

Gänzlich anders sind die Vorgänge bei der Anregung mittels Ultraschall. Hier wird das Prüfobjekt in Schwingungen versetzt, die im Inneren des Prüfobjekts zu Relativbewegungen führen. Infolgedessen entsteht im Bereich loser Grenzflächen Reibungswärme, die sich zur Oberfläche hin ausbreitet (Bild 1).

Durch den Einsatz der Lockin-Technik liegt die Empfindlichkeit der Thermogra-

fiesysteme im Bereich von wenigen Millikelvin. Zusätzlich können mittels Lock-In- oder Pulsphasenthermografie Rückschlüsse auf die Tiefenlage einer Anomalie im Prüfobjekt gezogen werden.

### Digitale Shearografie

Das Prinzip der digitalen Shearografie beruht darauf, dass Verformungen sowohl in der Ebene als auch aus der Ebene heraus durch die Erfassung von Weglängenänderungen kohärenter elektromagnetischer Wellen zwischen einem Objekt und einem Detektor flächenhaft ermittelt werden können.

Dies wird ermöglicht durch die Ausnutzung von Interferometrien von jeweils benachbarten Laserstrahlen und die Auswertung resultierender Phasenänderungen. Um diese zu generieren, unterzieht

**Bild 3. Konzept einer Prüfstation zur prozess-integrierten Qualitätsprüfung von Kupplungsscheiben**



man das Prüfobjekt einer Belastung und subtrahiert pixelweise die Phasenlagen davor und danach. Infrage kommen beispielsweise das Anlegen eines Vakuums oder thermische Belastungen.

Durch die gezielte Anregung von mechanischen oder thermomechanischen Verformungen lassen sich Defekte wie Delaminationen, Einschlüsse und auch Kissing Bonds diskret abbilden, da an diesen Störstellen andere Steifigkeitsverhältnisse im Prüfobjekt vorliegen als in ungestörten Bereichen. So kommt es durch Aufbringen einer flächigen thermischen Beanspruchung zu einer lokalen Ausbeulung des Prüfobjekts im Bereich von Defekten aufgrund des sich einstellenden Temperaturmoments und der daraus resultierenden thermomechanischen Verformungen (Bild 2).

Mit dieser Methode lassen sich Verformungen im Bereich der Wellenlänge des eingesetzten Lasers, das heißt im oberen Nanometerbereich detektieren.

### Kriterien für die Auswahl

Sowohl die aktive Thermografie als auch die digitale Shearografie liefern digitalisierte Grauwertbilder, in denen jedem Pixel je nach Digitalisierungstiefe ein Zahlenwert zugewiesen wird. Damit steht ein quantifiziertes Signal zur Verfügung, das ausgewertet werden kann. Als Auswertekriterien für Gut/Schlecht-Entscheidungen können unterschiedliche Größen verwendet werden.

Bei der Thermografie stehen primär Signalamplitude und im Falle einer Lockin-Untersuchung zusätzlich noch die Phasenlage des Signals zur Verfügung. Die Amplitude ist dabei ein Maß für die Temperatur, die Phase bildet den zeitlichen

Versatz der Amplitude ab. Beide Größen eignen sich zur Auswertung, da sich im Bereich eines Defekts an der Oberfläche des Prüfobjekts eine andere Temperatur einstellt, deren Amplitude gegenüber der Umgebung zeitlich verschoben ist.

Für die Shearografie stehen zunächst nur Grauwertbilder zur Verfügung, die im Bereich von Verformungsänderungen Hell/Dunkel-Muster liefern. Diese sind bereits für eine Gut/Schlecht-Entscheidung geeignet, liefern aber noch kein quantitatives Ergebnis. Dieses steht erst nach der Integration der Messdaten als Absolutverformung des Prüfobjekts zur Verfügung.

Welches Kriterium letztendlich zur Bewertung des Bauteilzustands herangezogen wird, muss je nach Prüfaufgabe individuell entschieden werden.

### Auswahl des Verfahrens

Zur Beurteilung der Qualität der Klebeverbindung zwischen Reibbelag und Trägerscheibe sind grundsätzlich beide Verfahren geeignet. Jedes Verfahren hat dabei abhängig von der Beschaffenheit der Kupplungsscheiben Vor- und Nachteile.

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, hat in umfangreichen Studien an unterschiedlich aufgebauten Kupplungsscheiben festgestellt, dass die aktive Thermografie mit Wärmeanregung bei verschiedenen Reibbelagsmaterialien zu Prüfzeiten führt, die sich nur bedingt für eine prozessintegrierte Prüfung eignen.

Dieselben Beläge sind innerhalb einer Sekunde mittels ultraschallangeregter Thermografie prüfbar. Ferner haben die Untersuchungen gezeigt, dass mittels Shearografie kleinere Defekte nachgewiesen

### Autoren

**Wolfgang Schmidt**, geb. 1966, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Prüfsysteme am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

**Dr.-Ing. Tina Wilhelm**, geb. 1974, ist Gruppenleiterin der Abteilung Prüfsysteme am Fraunhofer IPA.

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl**, geb. 1966, ist Leiter des Fraunhofer IPA.

### Kontakt

**Dr.-Ing. Tina Wilhelm**  
tina.wilhelm@ipa.fraunhofer.de

[www.qm-infocenter.de](http://www.qm-infocenter.de)

Diesen Beitrag finden Sie online unter der Dokumentennummer: **QZ110232**

werden können als bei thermografischen Untersuchungen. Auch enthalten die shearografischen Ergebnisse bei ungeprägten Oberflächen deutlich weniger Störeinflüsse im Ergebnisbild. Nachteilig an der Shearografie ist der erhöhte Bildverarbeitungsaufwand bei der Auswertung der geprüften Reibbeläge mit Prägung.

Die Auswahl des geeigneten Verfahrens für eine prozessintegrierte Prüfung muss von Fall zu Fall erfolgen, um es möglichst optimal auf die Prüfanforderungen und das Produktspektrum anzupassen. In den Untersuchungen des Fraunhofer IPA haben sich dabei zwei Methoden als eine Art Standardlösung herauskristallisiert.

Zum einen die Kombination der aktiven Lockin-Thermografie mit Ultraschallanregung. Diese Lösung zeichnet sich durch extrem kurze Prüfzeiten aus und hat sich zum Nachweis größerer Defekte bei dicken Reibbelägen bewährt. Dabei wird eine ungekühlte Infrarotkamera mit 288 x 384 Pixeln eingesetzt, zur Anregung dient ein modifizierter Ultraschallschweißgenerator (Bild 3).

Zum Nachweis von kleinen Defekten bei dünnen Reibbelägen eignet sich besonders die Kombination von digitaler Shearografie mit thermischer Belastung des Prüfobjekts. Dabei wird ein Shearografiesystem mit nicht fokussierenden Laserdioden in Verbindung mit einem Halogenstrahler zur Wärmeanregung verwendet. Mit diesen Methoden lassen sich im voll automatisierten Betrieb Prüfzeiten von bis zu einer Sekunde je Kupplungsscheibe erreichen. □