

# Verborgenes sichtbar gemacht

## Optische Prüf- und Messmethoden für das Materialinnere

• Oft lässt eine visuelle Oberflächenprüfung keine ausreichenden Rückschlüsse auf die Qualität eines Werkstückes zu. Fehlstellen wie Lunker, Poren oder mangelhafte Fügeverbindungen sind äußerlich kaum erkennbar, können sich aber erheblich qualitätsmindernd und sicherheitskritisch auswirken. Hier setzen Inspektionsverfahren an, die im nicht-sichtbaren Bereich des Wellenlängenspektrums arbeiten und so zerstörungsfrei den Blick in das Materialinnere eröffnen – sie können Verborgenes sichtbar machen.

### Durchblick mit Computertomographie

In der industriellen Prüfung wird Röntgenstrahlung heute im Wesentlichen auf zwei Weisen eingesetzt. Die Radioskopie arbeitet mit der Projektionstechnik und erzeugt zweidimensionale Durchstrahlungsbilder in die Ebene, während die Computertomographie (CT) als Schnittbild gebendes Verfahren den Messbereich schichtweise scannt. So lassen sich scheibenweise dreidimensionale Volumendatensätze gewinnen. In einer Messung können verdeckte Strukturen beliebig komplexer Objekte aus fast allen Materialien untersucht und mit hoher Genauigkeit vollständig erfasst werden. Die dreidimensionale Darstellung am Rechner ermöglicht darüber hinaus einen Soll-Ist-Vergleich zur Überprüfung der Maßhaltigkeit oder Formänderung von Bauteilen.

Insbesondere in der Automobilindustrie stellt die Radioskopie heute eines der wichtigsten Hilfsmittel der Qualitätssicherung dar. Derzeit werden von den Zulieferern alle Sicherheitsteile in der Regel zu 100 Prozent und im Sekundenbereich mit der einfachen Durchstrahlung kontrolliert.

Stand der Technik sind jedoch Tomographiesysteme. Die vollumfängliche Prüfung hat in den letzten Jahren bei der Fehleranalyse und in der Entwicklung stark an Bedeutung gewonnen. In Verbindung mit automatischer Bildauswertung wird die Technik erfolgreich für die Qualifizierung von Proto-

typen im Bereich der Erstbemusterung und beim Reverse-Engineering eingesetzt, beispielsweise für Gussteile aus Kunststoff oder Leichtmetall.

Bei einer Prüfung wird das Werkstück auf einem Drehtisch zwischen Röntgenquelle und Detektor positioniert. Das gesamte Objekt befindet sich dabei im Kegelstrahl und wird während einer einzigen Rotation tomographiert. Die Messzeit kann bei aktuellem Stand der Technik zwischen 20 Sekunden und einigen Minuten liegen. Da hierbei sehr große Mengen an Messdaten anfallen, müssen höchst effiziente Rekonstruktionsalgorithmen zur Verfügung stehen, um einen nachfolgenden Zeitverlust bei der Rekonstruktion zu vermeiden.

Im Vergleich zur herkömmlichen 3-D-Computertomographie werden bei der innovativen Helix-CT schraubenförmige statt der sonst üblichen Kreisbahnen gefahren. Hierfür wird das Objekt von Projektion zu Projektion geringfügig gedreht und gleichzeitig in Richtung der Drehachse verschoben. Durch die intelligente Aufnahmegeometrie wird die Detailerkennbarkeit im gesamten Messvolumen verbessert und die Problematik sonst typischer Abbildungsfehler, der sogenannten Feldkamp-Artefakte, vermieden (Abbildung 1).

Damit ermöglicht die Helix-CT in Verbindung mit mechanischen oder optischen Sensoren zur Referenzierung auch präzises dimensionelles Messen, das heißt Metrologie mit minimalen geometrischen Fehlern. Eben-

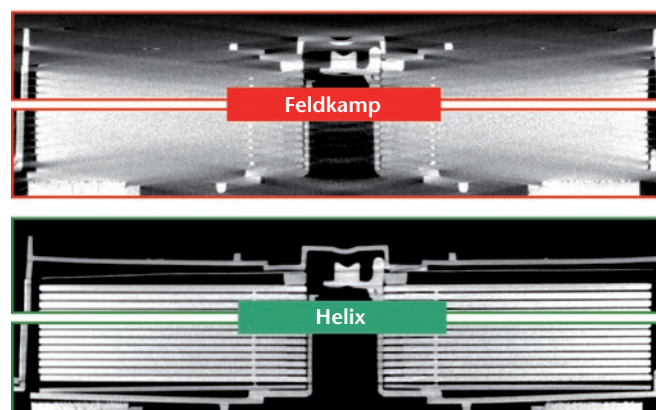


ABB. 1: Oben: Schicht eines rekonstruierten Volumendatensatzes einer CD-Spindel – Konventionelle Feldkamp-Rekonstruktion. Unten: Schicht eines rekonstruierten Volumendatensatzes einer CD-Spindel – Proprietäre Helix-Rekonstruktion (spezielle Filterung und Gewichtung). (Quelle: Fraunhofer EZRT)

### DER AUTOR

#### MICHAEL SACKEWITZ

Michael Sackewitz ist verantwortlich für Wissenschaftsmarketing bei der Fraunhofer-Allianz *Vision*. Vor seinem Eintritt in die Fraunhofer-Gesellschaft hat er 15 Jahre Praxiserfahrung als Ingenieur im Maschinenbau und an der Schnittstelle von Wirtschaft und Wissenschaft in Einrichtungen wie der IHK gesammelt.



Fraunhofer-Allianz *Vision*  
E-Mail: [vision@fraunhofer.de](mailto:vision@fraunhofer.de)  
Website: [www.vision.fraunhofer.de](http://www.vision.fraunhofer.de)

falls können damit sehr lange Objekte wie Rohre, Stangen oder Rotorblätter innerhalb eines einzigen Messvorgangs erfasst werden.

### Thermographie offenbart Fehler

Oberflächennahe Fehler wie beispielsweise geschlossene Risse in Metallen sind nur schwer mit der Röntgentechnik detektierbar. Diese Aufgabe ist mit Thermographieverfahren gut zu lösen, die dem menschlichen Auge sonst verborgene Einblicke erlauben.

Die Wärmefluss-Thermographie ist eine berührungslose und zerstörungsfreie Methode, mit der äußerlich nicht erkennbare Defekte durch Analyse des Wärmeflusses bzw. der Wärmeleitfähigkeit im Probenkörper sichtbar gemacht werden können. Dazu werden aktiv eingekoppelte oder durch den Herstellungsprozess bedingte Wärmeflüsse im Prüfobjekt ausgenutzt, die sich an Fehlstellen charakteristisch verändern. Unterschiedliche Wärmeflüsse im Inneren spiegeln sich in der Temperaturverteilung an der Oberfläche der Prüfobjekte wider (Abbildung 2 und 3). Mit einer ausreichend schnellen und empfindlichen Infrarotkamera kann der zeitliche Verlauf dieser Temperaturverteilung erfasst werden. Aus der Dynamik lassen sich Rückschlüsse auf die geometrische Struktur und Tiefenlage der im Material verborgenen Unregelmäßigkeiten und Grenzflächen ziehen. In vielen praktischen Fällen lässt sich die Wärmefluss-Thermographie deshalb auch zur flächemäßigen Verifikation von Schichtdicken in Verbundmaterialien heranziehen.

Da es sich letztlich um ein bildgebendes Funktionsprinzip handelt, können viele bewährte Verfahren der klassischen Bildverarbeitung für eine automatische Fehlererkennung adaptiert werden. Auch sehr große und schnell bewegte Objekte lassen sich aufgrund der hohen Prüfgeschwindigkeit thermographisch untersuchen. Durch die gute Automatisierbarkeit ist das Verfahren auch für eine 100-Prozent-Online-Kontrolle im industriellen Einsatz geeignet, beispielsweise im Bereich der Photovoltaik.

Bei der Herstellung von Solarzellen können Risse im Silizium-Material auftreten, die die Funktion und die Haltbarkeit der Zellen maßgeblich beeinträchtigen. Um einwandfreie Qualität sicher zu stellen, ist eine vollständige Kontrolle auf äußerlich sichtbare und innere Risse unabdingbar. Das Thermographie-Prüfsystem wird dabei direkt an den Fördermodulen der Fertigungsanlage platziert und arbeitet im Takt der Produktion. Bei einem Vorschub von typischerweise zehn Metern pro Minute lassen sich auch Risse mit einer Breite von kleiner 20 Mikrometern detektieren. Die aufgezeichneten Bilddaten erlauben eine automatische Auswertung und anschließende Klassifizierung der Solarzellen.

Ein weiterer Einsatzbereich zeigt sich in der Prüfung von Rotorblättern. Für einen reibungslosen Betrieb müssen diese regelmäßig gewartet werden. Mithilfe der Thermographie können die häufigsten Materialdefekte wie Risse, Verklebungsfehler oder Lufteinschlüsse gefunden werden (Abbildung 4). Die moderne Infrarottechnik kann Flächen von mehreren Quadratmetern in-

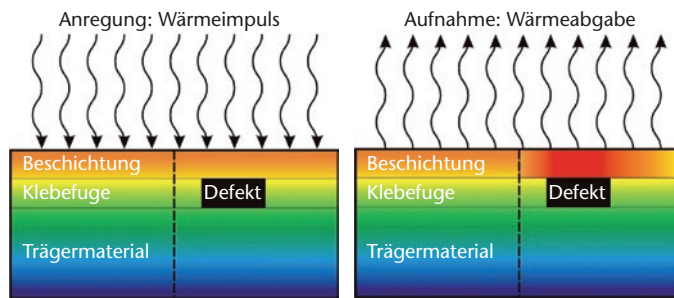


ABB. 2 + 3: Prinzip der aktiven Wärmefluss-Thermographie. Oberhalb des Defekts staut sich die Wärme. Dies kann mit einer Thermographie-Kamera sichtbar gemacht werden. (Quelle: Fraunhofer WKI)

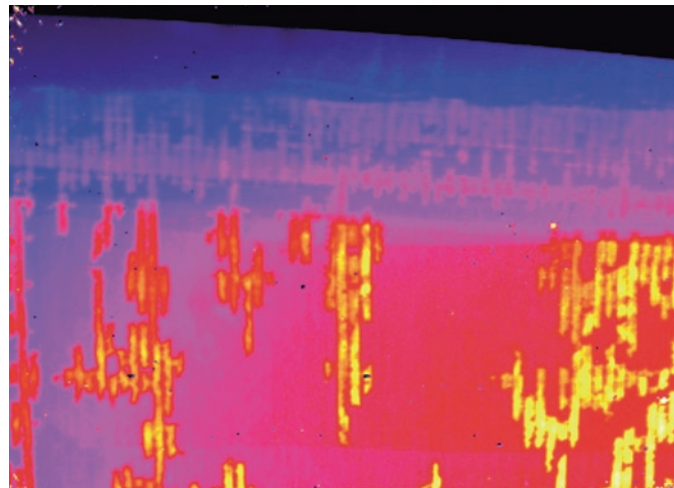


ABB. 4: Thermographie-Aufnahme von Lufteinschlüssen im Bereich der Hinterkante eines Rotorblattes aus glasfaserverstärktem Kunststoff. (Quelle: Fraunhofer WKI)

**► DIE ALLIANZ**

**Fraunhofer-Allianz Vision**

Die Fraunhofer-Allianz Vision ist ein Zusammenschluss von Fraunhofer-Instituten zu den Themen Bildverarbeitung, optische Inspektion und 3-D-Messtechnik, Röntgenmesstechnik und zerstörungsfreie Prüfung. Die Fraunhofer-Allianz Vision hat sich zum Ziel gesetzt, neue Entwicklungen unter industriellen Bedingungen einsetzbar zu machen. Auf Wunsch werden Komplettlösungen einschließlich aller Handhabungskomponenten bereit gestellt. Daneben veranstaltet Fraunhofer Vision regelmäßig Praxis-Seminare zu unterschiedlichen Themenbereichen der industriellen Bildverarbeitung.

[www.vision.fraunhofer.de](http://www.vision.fraunhofer.de)

nerhalb einer Minute vollständig erfassen. Sie stellt einen zuverlässigen Ersatz für die traditionelle visuelle oder Perkussionsmethode dar. Außerdem ist sie auch für die fertigungsbegleitende Qualitätskontrolle von Rotorblättern geeignet.

Die bisherigen Erfahrungen im Umgang mit der Thermographie lassen vermuten, dass bisher nur ein Bruchteil der sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten bekannt ist.

### Shearographie für quantitative Messergebnisse

Die Shearographie liefert nicht nur qualitative Informationen zu Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften bei Werkstoffverbunden, sondern erlaubt auch zerstörungsfrei die quantitative Bestimmung von Deformationen. Das interferometrische Verfahren arbeitet mit einer Auflösung im sub- $\mu$ -Bereich und ermöglicht das Erkennen von Fehlstellen unter der Materialoberfläche.

Verformungen der Objektoberfläche aufgrund mechanischer, thermischer oder pneumatischer Belastung werden durch Laufzeitmessung eines Laserstrahls optisch gemessen. Dabei wird ein an optisch rauen Oberflächen vom Prüfobjekt reflektierter Laserstrahl mit einem aus der gleichen Lichtquelle abgeleiteten Referenzstrahl verglichen. Das Interferenzbild gibt Aufschluss über lokale Steifigkeitsänderungen und erlaubt somit Rückschlüsse über die Art und Position eines Defektes im Inneren des Bauteils. Äußerlich nicht sichtbare Fehlstellen lassen sich so mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern detektieren.

Die Shearographie eignet sich insbesondere zur Beurteilung von Materialverbänden, welche mit anderen Verfahren nur unzureichend oder gar nicht untersucht werden können. So kann zum Beispiel die Qualität der Bindung von Reibbelägen bei Kupplungsscheiben nachgewiesen werden,

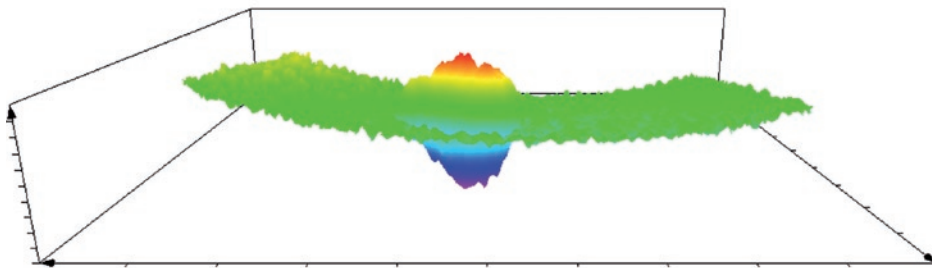


ABB. 5: Dreidimensionale Darstellung des Verformungsgradienten eines Fehlers in der Kupplungsscheibe mit Shearographie. (Quelle: Fraunhofer IPA)

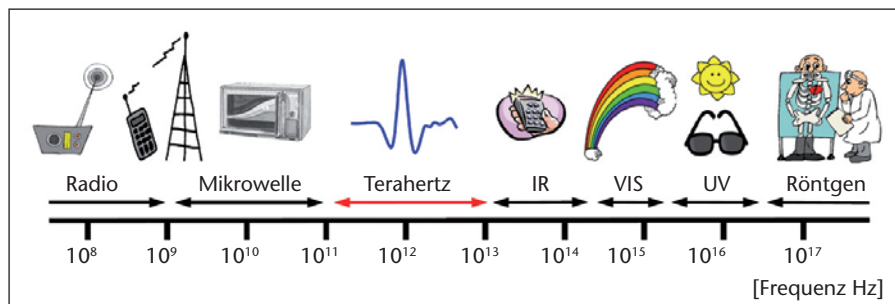


ABB. 6: Wellenspektrum (Quelle: Fraunhofer IPM)

indem die Out-of-Plane-Verformungen von wärmebeaufschlagten Kupplungsscheiben ermittelt werden (Abbildung 5).

Praxisrelevante Einsatzgebiete finden sich auch beim Aufspüren von schadhaften Stellen in Reifen und bei der Visualisierung mechanischer Schwingungen.

### Terahertz-Messtechnik – Blick in die Zukunft

Die Terahertz-Messtechnik befindet sich noch im Entwicklungsstadium, verspricht aber für die Zukunft als Imaging- und Tomographie-Verfahren interessante Lösungen für die Bauteilprüfung. Mit Frequenzen zwischen 0,1 und 10 Terahertz liegt dieser technisch noch nicht intensiv genutzte Spektralbereich zwischen Mikrowellen und Infrarotstrahlung (Abbildung 6).

Mögliche Anwendungsbereiche für industrielle Prozesse sind unter anderem die Überwachung der Aushärtungsprozesse von Klebstoffen, die orts aufgelöste Messung der Feuchte in einem Volumen, die Schichtdickenmessung oder die Delaminationskontrolle. Insbesondere viele Kunststoffe und Keramiken sind im Terahertz-Frequenzbereich aufgrund geringer Absorption quasi transparent. Auf diese Weise ist es möglich, diese unpolaren und nicht metallischen Stoffe im Volumen zu untersuchen oder versteckte Objekte durch das Material hindurch zu detektieren.

#### ZUM THEMA

Eine wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Bildverarbeitung in der industriellen Praxis ist das Wissen über die Leistungsfähigkeit und Grenzen der neuesten Technologien. Einen Beitrag hierzu soll die Leitfaden-Reihe der Fraunhofer-Allianz *Vision* leisten, die den Stand der Technik allgemeinverständlich und anschaulich darstellt. Die Leitfaden-Reihe umfasst mittlerweile neun Bände. Jeder Band widmet sich einem speziellen Themenbereich der industriellen Bildverarbeitung. Für 2010 ist eine weitere Ausgabe zu der im Artikel beschriebenen Thematik „Verborgenes sichtbar machen“ geplant. Darüber hinaus arbeitet Fraunhofer *Vision* derzeit an der dritten Ausgabe einer langfristig angelegten Marktstudie zur Entwicklung der berührungslosen 3-D-Messtechnik in der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie.

Dabei vereinigt Terahertz-Strahlung die Vorteile angrenzender spektraler Bereiche: Hohe Eindringtiefe und geringe Streuung bei gleichzeitig guter räumlicher Auflösung sind charakteristisch. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Energie ist die Strahlung nicht ionisierend und für den menschlichen Organismus unbedenklich.

Die Terahertz-Technik steht heute an einer vergleichbaren Schwelle wie die Lasertechnik Ende der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts. So sind einerseits grundlegende physikalisch-technische Fragestellungen geklärt und erste Anwendungen demonstriert, doch steht eine generelle industrielle Umsetzung der Technik noch aus. Hierfür wird an der Entwicklung leistungsstarker Terahertz-Quellen ebenso gearbeitet, wie an einem schnellen Sensor zur Datenerfassung.

#### Fazit

Berührungslose optische Prüfverfahren, die im nicht-sichtbaren Teil des Wellenlängenspektrums arbeiten, erweitern das Anwendungsspektrum industrieller Bildverarbeitungssysteme erheblich. Bereits marktrelevante Technologien werden permanent weiterentwickelt und für die industrielle Nutzung optimiert. Gewünscht sind einfache, automatisierbare Geräte, mit denen sich unterschiedlichste Prüfaufgaben in schnellen Messprozessen vollständig und prozessintegriert lösen lassen. Daneben bieten neue Technologien wie das Messen mit Infrarot oder die Terahertz-Technik für die Zukunft bisher ungenutzte Einsatzpotentiale und werden weiter den Weg in die Praxis finden.