

Frei positionierbare Dual-Roboteranlage zur zerstörungsfreien Prüfung von großflächigen Leichtbaustrukturen

Freely positionable dual-robot system for non-destructive testing of large-surface lightweight structures

Timo Reindl¹, Marc Kreutzbruck¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart, Deutschland

Kontakt E-Mail: timo.reindl@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Mit dem zunehmenden Einsatz von großflächigen Leichtbaustrukturen im Flug- und Automobilbereich, aber auch in der Baubranche ergeben sich neue Herausforderungen für die zerstörungsfreie Materialprüfung (ZfP) der Komponenten. Besonders mehrachsig komplex gekrümmte Bauteile lassen sich mit konventionellen scannenden Methoden nur bedingt prüfen. Im Rahmen eines DFG-Großgeräte-Projektes wird daher am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart eine flexible Dual-Roboteranlage zur zerstörungsfreien Materialprüfung von großflächigen Leichtbauteilen aufgebaut. In der entstehenden Forschungsplattform lassen sich die 4 t schweren Robotereinheiten auf Luftkissen frei im Raum verschieben. Die Anlage besitzt Toolchanger, mit denen zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall, Wirbelstrom, Thermografie oder auch viele neuartige Prüfansätze voll automatisiert eingesetzt werden können. Die Herausforderung für den Einsatz in der ZfP liegt in den erforderlichen hohen Bahnengenauigkeiten, die mit Standardrobotern nicht erreichbar sind. Aus diesem Grund handelt es sich hier um voll kalibrierte Systeme, die Fehler in der Bahnpositioniergenauigkeit von unter 150 µm erreichen können.

Abstract

With the increasing use of large-surface lightweight structures in the aviation and automotive sectors, but also in the construction industry, new challenges arise for the non-destructive material testing (NDT) of the components. Especially multiaxial complex curved components can only be inspected to a limited extent using conventional scanning methods. Therefore, as part of a German Research Foundation (DFG) major instrumentation project, a flexible dual-robot system for non-destructive material testing of large-area lightweight components is being set up at the Institut für Kunststofftechnik (Institute for Plastics Engineering) at the University of Stuttgart. In the research platform, the 4 t robot units can be moved freely in space on air cushions. The facility has toolchangers with which NDT methods such as ultrasound, eddy current, thermography and even many novel testing approaches can be used in a fully automated manner. The main challenge for the use in NDT is the required high path accuracy, which cannot be achieved with standard robots. Therefore, the systems presented here are fully calibrated and achieve path positioning accuracy errors of less than 150 µm.

1 Einführung

Die Anforderungen an moderne Strukturbauteile steigen stetig. Sei es durch Werkstoffleichtbau mit faserverstärkten Hochleistungskunststoffen oder durch konstruktiven Leichtbau, moderne Leichtbauteile sind heterogener als konventionelle Metallwerkstoffe und besitzen zunehmend geometrisch komplexe Formen [1]. Mit diesen Entwicklungen steigen auch die Anforderungen an die Prüfung der Bauteile, sowohl im Rahmen der Herstellung, als auch über den Einsatzzeitraum hinweg. Die Herausforderung bei der auf Robotern beruhenden automatisierten Materialprüfung liegt in den sehr hohen Ansprüchen der Positionsgenauigkeit. Besonders bei Transmissionsanwendungen gilt es Sender und Empfänger exakt aufeinander auszurichten. Abweichungen in der axialen Ausrichtung schlagen sich im Messsignal wieder und können die Qualität der Prüfaussage mindern. Robotersysteme weisen naturbedingt eine gute Positionswiederholgenauigkeit auf, die bei kleinen

Robotern deutlich unter 100 µm liegen kann. Im Gegensatz dazu ist die Genauigkeit auf dem Weg zu dieser Position aber eher gering und liegt mehr als eine Größenordnung über der Positionsgenauigkeit. Die Ursache hierfür liegt unter anderem in der mechanischen Verformung einzelner Achsen bei unterschiedlichen Lastzuständen. Erst durch eine Kalibrierung lassen sich die für die verschiedenen ZfP-Verfahren erforderlichen Genauigkeiten erreichen.

2 Systemanforderungen

2.1 Flexibilität

Zur zerstörungsfreien Prüfung von mehrachsig gekrümmten Bauteilen bietet sich der Einsatz von positionsgenauen Sechssachsrobotern an. Das Prüfen großflächiger Bauteile in Transmission erfordert den Einsatz zweier gekoppelter Robotersysteme. Um wechselnden Anforderungen gerecht

zu werden liegt ein hohes Augenmerk auf der Flexibilität des Systems. Daher sieht der Entwurf ein flexibles, frei positionierbares System (**Bild 1**) aus einem primären und einem sekundären Roboter vor, die auf Luftkissen verfahrbar sind. Je nach Anwendung muss dabei entweder der primäre Roboter einzeln oder beide Roboter gekoppelt betrieben werden können. Dem gemeinsamen Arbeitsbereich der Roboter kommt eine besondere Bedeutung zugute, um auch großflächige Bauteile gekoppelt abfahren zu können. Hierzu werden Roboter des Typs TX200L der Fa. Stäubli, Pfäffikon, Schweiz eingesetzt, welche eine Tragkraft von bis zu 100 kg besitzen und über eine Reichweite von 2,4 m verfügen.

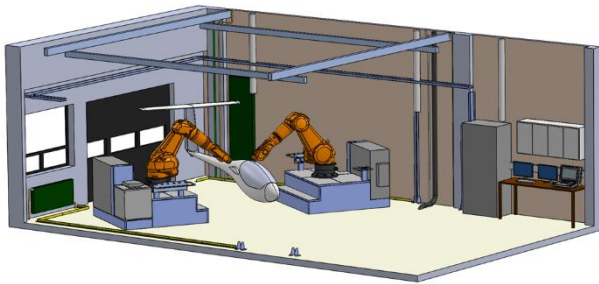


Bild 1 Konzeptioneller CAD Entwurf der Dual-Roboteranlage

Die Realisierung und der Aufbau des Gesamtsystems erfolgen durch die Fa. Fill, Gurten, Österreich. Der Einsatz eines automatischen Toolchangers der Fa. Schunk, Lauffen am Neckar ermöglicht den schnellen und flexiblen Wechsel zwischen verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zur Datenerfassung kommt ein A/D Konverter des Typs CSE8482 der Fa. Gage Applied Technologies, Lockport, Illinois, USA zum Einsatz. Die hohe Abtastrate ermöglicht die Realisierung hoher Prüfgeschwindigkeiten von über 1 m/s. **Bild 2** zeigt die Anlage während erster Messungen an einem Fahrzeugunterboden aus CFK.



Bild 2 Vorläufiger Versuchsaufbau während der Prüfung eines CFK Fahrzeugunterbodens

2.2 Bahngenaugkeit

Wie bereits erwähnt, stellt eine besondere messtechnische Herausforderung, insbesondere bei Prüfverfahren in Transmission, die erforderliche hohe Bahngenaugkeit der Roboter dar. Diese wird hier mithilfe eines Lasertrackingsystems der Fa. Isios, Berlin durch eine gezielte Kalibrierung und eine lastabhängige in-situ Korrektur erreicht. Das Trackingsystem nutzt dabei die Laserstrahlen, um das reale kinematische Modell der Roboter zu identifizieren. Alle erkannten Abweichungen vom Sollmodell werden berücksichtigt, um einen realistischen digitalen Zwilling zu erzeugen. Die inverse Kinematik wird simultan im Interpolationszyklus der Steuerung berechnet und eventuelle Ausrichtungsfehler werden in Echtzeit kompensiert. Ein beispielhaftes Kalibrierergebnis anhand der Positionswiederholgenauigkeit zeigt nachfolgend **Tabelle 1**.

	Unkalibriert in μm	Kalibriert in μm
Mittlerer Fehler	1880	50
Standardabweichung	890	40
Maximalfehler	4090	140

Tabelle 1 Positionswiederholgenauigkeit vor und nach der Laserkalibrierung (nach [2])

Beim Ansatz der freien Positionierung erfüllt das Lasertrackingsystem aber auch eine weitere grundlegende Funktion. Während Dual-Roboteranlagen zur Prüfung sehr großer Bauteile üblicherweise auf Linearachsen montiert sind und die Position der Prüfroboter hierüber stets bekannt ist, ist deren Position im Raum bei den auf Luftkissen verschiebbaren Robotern hingegen zunächst unbekannt. Das an den Robotern montierte Lasertrackingsystem referenziert die Roboter zueinander. Nach der Kalibrierung arbeiten die Roboter dann trotz der freien Positionierbarkeit in einem gemeinsamen Referenzkoordinatensystem.

3 Luftgekoppelter Ultraschall

Zunächst wird das Robotersystem mit einem 4-Kanal Ultraschallprüfgerät des Typs SonoAir der Fa. Sonotec, Halle ausgestattet. Mehrkanalaufbauten erlauben damit das schnelle parallele Scannen von ebenen oder leicht gekrümmten Bauteilbereichen mit mehreren in Reihe angeordneten Prüfköpfen. Die Luftultraschallprüfung nimmt unter den zerstörungsfreien Prüfverfahren eine Sonderrolle ein. Durch den Wegfall von flüssigem Koppelmittel zwischen Prüfkopf und Bauteil müssen die Ultraschallwellen bei diesem Verfahren über die Luft übertragen und eingekoppelt werden. Damit eignet sich das Verfahren besonders für die berührungsfreie Messung empfindlicher Bauteile. Die hohen Impedanzunterschiede zwischen Luft und Bauteil bedingen allerdings hohe Reflexionsverluste an den Grenzflächen. Durch die hohe frequenzabhängige Dämpfung in Luft können in der Regel nur Frequenzen bis 1 MHz eingesetzt werden. Durch eine Schrägeinschallung lässt sich eine bessere Einkopplung und eine höhere

Amplitude erreichen [3]. Mit dem Robotersystem ist dies flexibel in jeder Achse möglich.

Zur Erprobung der Messsysteme wurde zunächst die Luftultraschall-Prüfplatte des ACUT Unterausschusses der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) herangezogen (**Bild 3**). Es handelt sich dabei um eine PMMA Platte mit gezielt eingebrachten definierten Schädigungen. Hierüber kann sowohl die Signalstärke als auch insbesondere die Positionszuordnung überprüft und bewertet werden.



Bild 3 Luftultraschall-Prüfplatte des DGZfP Unterausschusses ACUT

Die Prüfplatte wurde mit einem 200 kHz Luftultraschallprüfkopf des Typs CF200 der Fa. Sonotec, Halle geprüft. Ein C-Scan der Prüfplatte ist in **Bild 4** dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Draufsicht des Prüfteils. Für jeden gescannten Punkt wurde dafür der zeitliche Signalverlauf nach der jeweils maximalen Amplitude ausgewertet und farbcodiert als relativer Wert wiedergegeben. Das Bild zeigt einen guten Kontrast und grenzt die verschiedenen eingebrachten Geometrien deutlich voneinander ab. Auch der auf die Prüfplatte aufgebrachte Metallstreifen ist gut zu erkennen.

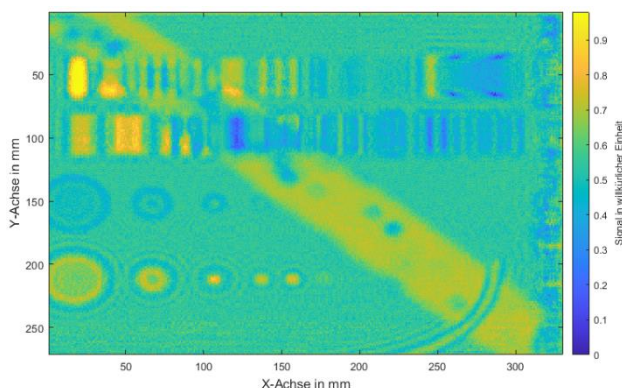


Bild 4 Luftultraschall C-Scan der ACUT-Prüfplatte

4 Ausblick

Zukünftig wird das System für verschiedene Forschungsprojekte eingesetzt, in denen komplexe Werkstoffe und Bauteile mit unterschiedlichen ZfP-Verfahren untersucht

werden. Hierbei werden verschiedene Fragestellungen adressiert. Insbesondere gilt es Fragen der Automatisierung bei der Fehlerdetektion für diverse Prüfsituationen zu untersuchen. Im Zuge des Wandels zur hochautomatisierten Industrie 4.0 nimmt die automatisierte zerstörungsfreie Prüfung eine immer größer werdende Rolle ein. Dabei wird angestrebt, einen digitalen Zwilling des Produkts zu erstellen, der alle Prüfergebnisse und Produktionsparameter beinhaltet. Für sicherheitsrelevante Bauteile ist oft eine vollständige Prüfung des Bauteils notwendig. Handelt es sich um komplexe 3D-Freiformflächen, ist die messtechnische Erfassung nur durch den Einsatz von Knickarmrobotersystemen vollständig auch im Kantenbereich und an engen Radien möglich. Für die Prüfung mit Robotersystemen ist es notwendig, etablierte Prüfmethoden entsprechend anzupassen und weiterzuentwickeln. Außerdem ist es oft notwendig die Prüfgeräte von schweren, stationären Geräten hin zu kleinen, am Roboter einsetzbaren Geräten zu optimieren. Die Forschung an den Untersuchungsmethoden und der Optimierung hinsichtlich der Einsetzbarkeit für die roboterbasierte zerstörungsfreie Prüfung läuft auf drei verschiedenen Ebenen ab (**Bild 5**): Fehlerdetektion an gekrümmten Bauteilen und Fehlergrößenbestimmung (1), Materialcharakterisierung (2, auch lokal) und Zuverlässigkeit der Prüfaussage (3). In diese drei Ebenen werden alle geplanten Forschungsprojekte eingeteilt.

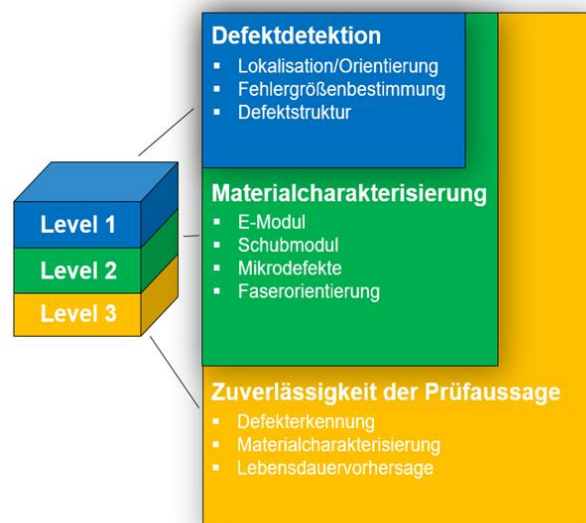


Bild 5 Ordnung der Forschungsthemen an der Dual-Roboteranlage

Letztlich ist es die Aufgabe der ZfP über die Ebenen 1 und 2 Informationen für eine i.O. oder n.i.O. Entscheidung bereitzustellen und im besten Fall die Betriebstauglichkeit auch durch eine Lebensdauervorhersage abzusichern. Als Forschungsplattform bietet das System diesbezüglich die Basis für eine Vielzahl von mehrachsigen Scanverfahren. Mit der Forschung an Messsystemen und Algorithmen für automatisierte zerstörungsfreie Prüfung arbeitet das Institut für Kunststofftechnik an der intelligent vernetzten, voll-automatisierten ZfP der Zukunft.

5 Danksagungen

Wir danken der Fill GmbH, Gurten, Österreich für die Realisierung des Vorhabens und die gute Zusammenarbeit. Das Vorhaben wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 445127768. Wir danken der DFG hierfür recht herzlich.

6 Literatur

- [1] ESSIG W. und M. KREUTZBRUCK. Schnelle, zerstörungsfreie Prüfung an 3D-Leichtbaukomponenten aus hybriden Werkstoffen mit Luftultraschall. In: *DGZfP Jahrestagung*, Koblenz, 2017.
- [2] ISIOS GMBH. *Robot calibration system RLS*. 2020.
- [3] BERNHARDT Y., N. LEHMANN und M. KREUTZBRUCK. Automatische Winkelfindung für die Prüfung mit Luftultraschall und geführten Wellen. In: *DGZfP Jahrestagung*, Friedrichshafen, 2019.