

Frei positionierbare Dualroboteranlage zur Freiformprüfung großer Bauteile mittels luftgekoppeltem Ultraschall

Yannick BERNHARDT¹, Timo REINDL¹, Marc KREUTZBRUCK¹,
Thomas GRAMBERGER²

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

² Fill Gesellschaft m.b.H., Gurten, Österreich

Kontakt E-Mail: Marc.Kreutzbruck@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Im Rahmen des DFG-Großgeräte-Projektes „JAMES & MAID“ wurde am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart eine flexible Dualroboteranlage zur zerstörungsfreien Materialprüfung (ZfP) von großflächigen Leichtbauteilen konzipiert und aufgebaut. Innerhalb der Forschungsplattform lassen sich die 4 t schweren Robotereinheiten auf Luftkissen frei im Raum verschieben. Die Anlage besitzt Toolchanger, mit denen zukünftig zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall, Wirbelstrom, Thermografie oder auch viele neuartige Prüfansätze voll automatisiert eingesetzt werden können. Gegenwärtig ist die Anlage mit einem 4-Kanal Luftultraschallsystem bestückt.

Eine besondere messtechnische Herausforderung stellt, insbesondere bei Prüfverfahren in Transmission, die erforderliche hohe Bahngenauigkeit der Roboter dar. Ein einzigartiges Laser-Sensor-System zur Kalibrierung, welches ohne einen stationär in der Zelle befindlichen Lasertracker auskommt, ist die Basis für eine modellbasierte Echtzeitkalibration der Kinematik und ermöglicht eine sehr hohe Absolutgenauigkeit. Die zusätzliche Nutzung des Systems zur Kalibration der beiden Roboterbasen zueinander stellt ein Novum dar – und erhöht die Flexibilität der mobilen „ACCUROVER“ Prüfanlage erheblich.

Das Laser-Sensor-System nutzt dabei die Laserstrahlen, um das reale kinematische Modell der Roboter zu identifizieren. Erkannte 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.

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 mehrachsig gekrümmte Formen [1]. Durch diese Entwicklungen steigen auch die Anforderungen an die Prüfung der Bauteile, sowohl im Rahmen der Herstellung, als auch über den Einsatzzeitraum hinweg. Entsprechende Bauteile weisen insbesondere oft eine hohe Anzahl innerer Grenzflächen und enge Radien auf. Die Herausforderung bei der auf Robotern beruhenden automatisierten Materialprüfung liegt in den sehr hohen Ansprüchen der

Bahgenauigkeit. Hierfür sind sowohl die Wiederholgenauigkeit als auch die Absolutgenauigkeit des Systems, welche sich beispielsweise nach ISO 9283 [2] bestimmen lassen, von großer Bedeutung. Besonders bei Transmissionsanwendungen gilt es Sender und Empfänger exakt aufeinander auszurichten. Abweichungen in der axialen Ausrichtung schlagen sich im Messsignal nieder und können die Qualität der Prüfaussage mindern. Robotersysteme weisen naturbedingt eine gute Wiederholgenauigkeit – für das Wiederanfahren eines Punkts im Raum – auf, die bei kleinen Robotern deutlich unter 100 µm liegen kann [3]. Im Gegensatz dazu ist die Absolutgenauigkeit aber eher gering und liegt regelmäßig mehr als eine Größenordnung über der Wiederholgenauigkeit. 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.

1. Systemanforderungen

1.1 Flexibilität

Zur zerstörungsfreien Prüfung von mehrachsiger gekrümmten Bauteilen bietet sich der Einsatz von positionsgenauen Sechssachsrobotern an. Das Prüfen großflächiger Bauteile in Transmission erfordert entweder den Einsatz zweier gekoppelter Robotersysteme oder einen hufeisenförmigen Prüfkopfträger mit gegenüberliegender Prüfkopfanzordnung. Um wechselnden Anforderungen gerecht zu werden, liegt ein hohes Augenmerk auf der Flexibilität des Systems. Daher sieht der Entwurf ein flexibles, frei positionierbares System (vgl. Abb. 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 scannen zu können. Um diesen möglichst groß zu gestalten, werden Roboter des Typs TX200L der Fa. Stäubli, Pfäffikon, Schweiz eingesetzt, welche eine Tragkraft von bis zu 100 kg besitzen und zwischen den Achsen 1 bis 5 über eine Reichweite von 2,4 m verfügen.

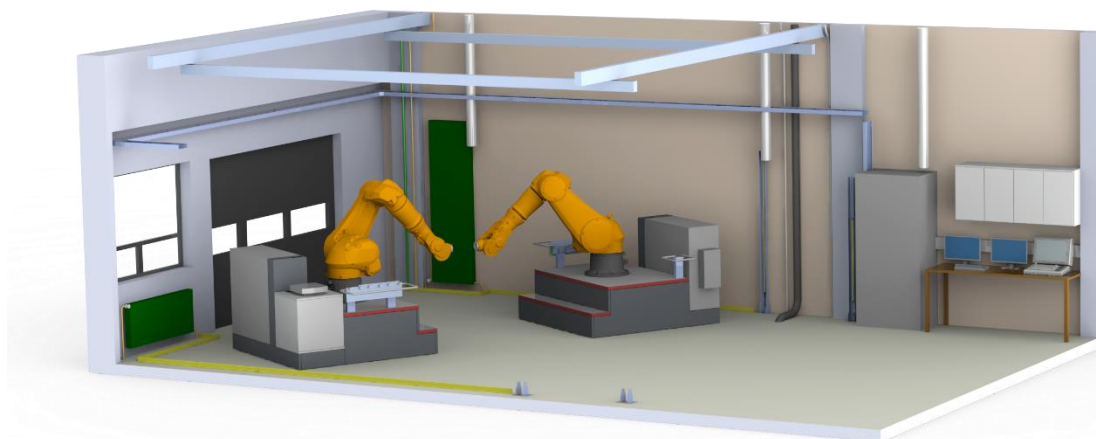


Abb. 1. Konzeptioneller CAD Entwurf der Dualroboteranlage

Die Realisierung und der Aufbau des Gesamtsystems erfolgen durch die Fa. Fill, Gurten, Österreich. Das Robotersystem ist als Luftultraschallanlage mit einem 4-Kanal Ultraschallprüfgerät des Typs SonoAir der Fa. Sonotec, Halle ausgestattet. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz eines automatischen Toolchangers der Fa. Schunk, Lauffen am Neckar den schnellen und flexiblen Wechsel zwischen weiteren zerstörungsfreien

Prüfverfahren. Zur Datenerfassung kommt eine Achtkanal Messkarte des Typs CSE8482 der Fa. Gage Applied Technologies, Lockport, Illinois, USA zum Einsatz, mit der neben Luftultraschallsignalen auch flexibel die Signale weiterer Prüfsonden digitalisiert werden können. Die hohe Abtastrate von 25 MS/s und die Bittiefe von 16-bit ermöglicht die Realisierung hoher Prüfgeschwindigkeiten von über 1 m/s. Abb. 2 zeigt die Anlage während erster Messungen an einem Fahrzeugunterboden aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) in den Räumen des Instituts für Kunststofftechnik, Stuttgart.



Abb. 2. Versuchsaufbau während der Prüfung eines CFK Fahrzeugunterbodens

1.2 Bahngenaugigkeit

Wie bereits erwähnt, stellt eine besondere messtechnische Herausforderung, insbesondere bei Prüfverfahren in Transmission, die erforderliche hohe Bahngenaugigkeit der Roboter dar. Nach einer Verschiebung der Roboter müssen deren neuen Positionen zueinander exakt vermessen werden. Dies wird hier mithilfe eines Laser-Sensor-Systems der Fa. Isios, Berlin durch eine gezielte Kalibrierung 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. Zusätzlich wird durch eine lastabhängige in-situ Korrektur eine hohe Bahngenaugigkeit erreicht. Die inverse Kinematik wird simultan im Interpolationszyklus der Steuerung berechnet und eventuelle Ausrichtungsfehler werden in Echtzeit kompensiert. Tabelle 1 zeigt nachfolgend ein beispielhaftes Kalibrierergebnis anhand der Wiederholgenauigkeit und der Absolutgenauigkeit der Roboter.

Tabelle 1. Positionsgenauigkeit der Roboter nach der Laserkalibrierung [4]

	Mittlerer Fehler	Standardabweichung	Maximalfehler
Wiederholgenauigkeit in mm	0,05	0,04	0,14
Absolutgenauigkeit in mm	0,21	0,12	0,66

Hierbei ist zu beachten, dass die angegebenen Messwerte einer konservativen Analyse entstammen, die den gesamten Arbeitsbereich der beiden Roboter abbildet und von einem Abstand zwischen Roboterflansch und Arbeitspunkt (TCP) von bis zu 1 m ausgeht. Demnach würden die Messwerte, ausgewertet im beschränkten Messbereich der ISO 9283, mutmaßlich signifikant besser ausfallen.

Beim Ansatz der freien Positionierung erfüllt das Laser-Sensor-System auch eine weitere grundlegende Funktion. Während Dualroboteranlagen 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 Laser-Sensor-System referenziert die Roboter zueinander. Nach der Kalibrierung arbeiten die Roboter dann trotz der freien Positionierbarkeit in einem gemeinsamen Referenzkoordinatensystem.

2. Luftgekoppelter Ultraschall

Mehrkanalluftultraschallsysteme erlauben 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 5 MHz eingesetzt werden [5]. Durch eine Schrägeinschallung lässt sich jedoch eine bessere Einkopplung und eine höhere Amplitude erreichen [6]. Mit dem Robotersystem ist dies flexibel in jeder Achse möglich.

Zur Erprobung der Messsysteme wurde zunächst die Luftultraschall-Prüfplatte des ACUT Unterausschusses der DGZfP herangezogen (vgl. Abb. 3). Es handelt sich dabei um eine PMMA-Platte mit den geometrischen Abmaßen 370 x 300 x 5 mm, in die gezielt definierte Schädigungen eingebracht sind. Hierüber kann sowohl die Signalstärke als auch insbesondere die Positionszuordnung überprüft und bewertet werden.



Abb. 3. Luftultraschall-Prüfplatte des DGZfP Unterausschusses ACUT mit hervorgehobenem Scanbereich
Die Prüfplatte wurde mit 200 kHz Luftultraschallprüfköpfen des Typs CF200 der Fa. Sonotec, Halle geprüft. Die Anregung erfolgte mit einer Spannung von 200 V und Bursts mit 7 Pulsen. Die Prüfplatte wurde mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s im Raster 0,5 x 0,5 mm unter 5° Schrägeinschallung gescannt. Der verwendete Abstand zwischen den Prüfköpfen und der Prüfplatte lag mit ca. 20 mm dabei über dem Fokusabstand der Prüfköpfe von 9 mm. Erfassungsseitig wurde keine Vorverstärkung eingesetzt.

Ein C-Scan der Prüfplatte ist nachfolgend in Abb. 4 dargestellt. Für jeden gescannten Punkt wurde dafür der zeitliche Signalverlauf nach der jeweils maximalen Amplitude ausgewertet und farbcodiert als relativer Wert wiedergegeben. Der Scan zeigt einen guten Kontrast und grenzt die verschiedenen eingebrachten Geometrien deutlich voneinander ab. Auch feine Details der Prüfplatte sind gut zu erkennen.

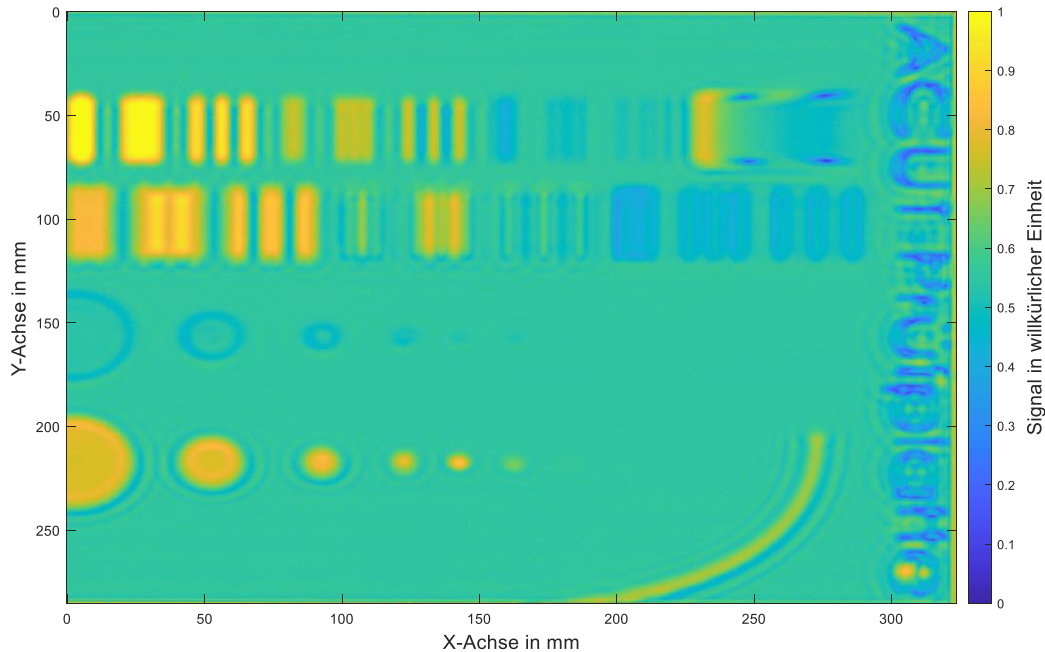


Abb. 4. Luftultraschall C-Scan der ACUT-Prüfplatte

3. Ausblick

Zukünftig wird das System für verschiedene Forschungsprojekte eingesetzt, in denen komplexe Werkstoffe und Bauteile mit unterschiedlichen ZiP-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 erforderlich, 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 (vgl. Abb. 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.

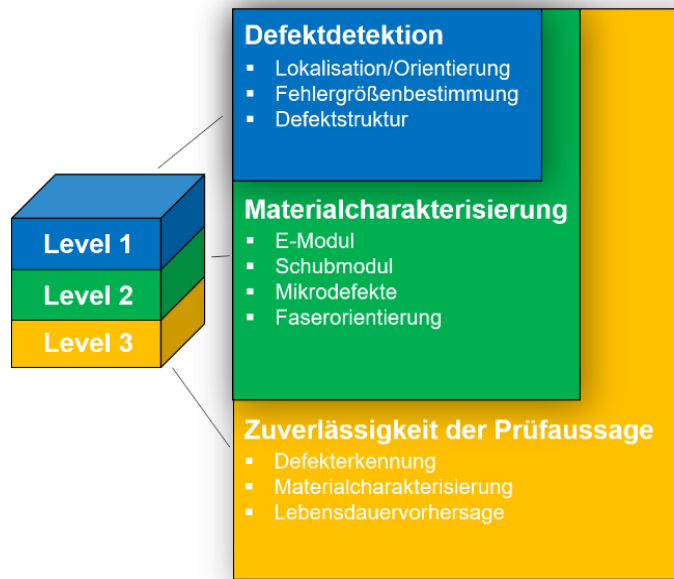


Abb. 5. Ordnung der Forschungsthemen an der Dual-Roboteranlage

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 die automatisierte zerstörungsfreie Prüfung arbeitet das Institut für Kunststofftechnik an der intelligent vernetzten, vollautomatisierten ZfP der Zukunft.

4. 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.

Referenzen

- [1] HENNING F. und E. MOELLER (Hg.). *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. Hanser, München, 2011. ISBN: 978-3-446-42267-4
- [2] ISO 9283:1998-04. *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*. Beuth, Berlin, 1998.
- [3] STÄUBLI INT. AG. *Industrial Robots*. 2022. Verfügbar unter: www.staubli.com
- [4] ISIOS ROBOTICS GMBH. *Calibration Report - Fill Accurover*. 2021. (Unveröffentlichter Bericht)
- [5] THE ULTRAN GROUP, *Ultrasonic Transducers*, 2018. Verfügbar unter: www.ultranguard.com
- [6] LUUKKALA M., P. HEIKKILI und J. SURAKKA. Plate wave resonance – a contactless test method. In: *Ultrasonics*, 9, S. 201–208, 1971. Doi: 10.1016/0041-624X(71)90387-8