

## Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) nicht nur in Nischenmärkten wie der Luftfahrt- oder Windkraftindustrie, sondern auch im Massenmarkt Automobil hat einen Wandel der Anforderungen an die Fertigungsprozesse und die Instandhaltung zur Folge. Aufgrund des Kostendrucks der Automobilindustrie können schadhafte Bauteile nicht großzügig herausgetrennt und ersetzt werden. Die Implementierung von ressourcen- und kosteneffizienten Reparaturverfahren wird durch die Schadenserkennung und -quantifizierung beschränkt. Ein vielversprechendes Verfahren zur CFK-Schadenscharakterisierung im Reparaturprozess ist die optische Lock-in Thermografie. Ihr Einsatz wird allerdings durch die qualitative und manuelle Auswertung durch Experten begrenzt.

Die vorliegende Arbeit adressiert daher das Defizit, indem die optisch angeregte Lock-in Thermografie zur Ermittlung der Geometrie von CFK-Schäden mit der erforderlichen Messunsicherheit für den Einsatz in der industriellen Praxis befähigt wird.

Im Forschungsprozess werden bestehende Ansätze zur Charakterisierung von CFK-Schäden mittels optischer Lock-in Thermografie systematisch analysiert. Als wesentlicher Störeinfluss der quantitativen Messung werden die bauteilspezifischen thermischen Eigenschaften, das Auftreten von lateralen Wärmeflüssen und Kontaktwiderständen identifiziert.

Zur Abbildung des Zusammenhangs von gemessenem Phasenwert und Schadenstiefe wird das komplexe Wellenfeldmodell in Abhängigkeit der Einflussparameter numerisch berechnet und als Datenbasis hinterlegt. Die Ermittlung der optimierten Anregungsfrequenz ermöglicht die schadensspezifische Reduzierung des lateralen Wärmeflusses während der Thermografiemessung. Die Erfassung der lateralen Schadensmerkmale erfolgt aufbauend auf der Tiefenbestimmung anhand des Phasenbildes optimierter Anregungsfrequenz. Durch eine Filterung zulässiger Phasenwerte zur quantitativen Auswertung wird die Verfälschung des Messergebnisses durch laterale Wärmeflüsse minimiert.

Abschließend wird die Messunsicherheit nach dem ISO/BIPM-Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) anhand von Referenzgeometrien ermittelt. Die Ergebnisse der Prüfprozesseignung nach VDA 5 qualifizieren den entwickelten Messprozess hinsichtlich der industriellen Anwendung im Kontext der Fahrzeugreparatur. Anhand der experimentellen Untersuchungen von impactgeschädigten Platten wird die Übertragbarkeit auf reale Schäden abgebildet. Mithilfe des entwickelten Messprozesses können neben geometrischen Merkmalen von CFK-Schäden auch Aussagen über auftretende Kontaktwiderstände und somit den Grad des Schadens und die thermischen Eigenschaften des Bauteils getroffen werden.

## Summary

The increasing use of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) not only in niche markets such as the aerospace and wind craft industry, but also in the mass market automotive, is changing the demands on manufacturing processes and maintenance. Up to now, damaged parts are generously replaced. Due to the cost pressure of the automotive industry this procedure is not applicable anymore. The implementation of resource and cost-efficient repair processes is limited by the damage detection and quantification in the first step. One promising approach for CFRP-damage characterization within the repair process is the application of optical lock-in thermography. Indeed, the evaluation of optical lock-in thermography images requires expert knowledge.

This thesis therefore addresses the deficit by enabling the optical lock-in thermography to determine the geometry of CFRP-damages with regard to the required measurement uncertainty of the industrial practice.

In the research process of this thesis existing approaches for the characterization of CFRP-damages by means of optical lock-in thermography are systematically analyzed. As a significant perturbation on the quantitative measurement, the component-specific thermal properties, the occurrence of lateral heat flows and contact resistances are identified.

To depict the dependence between measured phase value and depth of defect, the complex wave field model is determined. It is calculated numerically as a function of the influencing parameters for the entire solution space and saved as a database. The determination of the optimized excitation frequency enables the damage-specific reduction of lateral heat flows during the thermography measurement. Based on the measurement process for depth determination the phase image for the lateral damage characterization is selected. By filtering permissible phase values for quantitative evaluation the distortion of the measurement due to lateral heat flows is minimized.

Finally, the measurement uncertainty is determined according to the ISO/BIPM standard "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM) using reference geometries. The results of the process capability according to the VDA 5 standard qualify the developed measuring process with regard to industrial application in the context of automotive repair. The experimental investigations of impact damaged test samples ensure the transferability to real damaged parts. Based on the developed measurement process not only geometric features of CFRP-damages but also information about contact resistance and thus the degree of damage as well as the thermal properties of the component can be determined.