

Anwendung der induktiv angeregten Thermografie zur automatisierten und zerstörungsfreien Prüfung hybrider Prüfkörper

Christian GUNDLACH¹, Kevin ENGELMANN¹, Klaus DILGER¹, Sven HARTWIG¹
¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Braunschweig

Kontakt E-Mail: c.gundlach@tu-braunschweig.de

Kurzfassung. Die induktiv angeregte Thermografie stellt eine Methode zur automatisierten und zerstörungsfreien Prüfung hybrider Prüfkörper dar. Die eingesetzten Prüfkörper bestehen dabei aus einem speziell geformten Metalleinleger, der vollflächig von einem polymeren Vergusswerkstoff umgeben ist. Um ein hohes Maß an Vergleichbarkeit der händisch produzierten Prüfkörper und damit der erzielten Ergebnisse sicherzustellen, ist die Überprüfung der exakten Lage des Metalleinlegers im Inneren des Vergusspolymers erforderlich. Da das Vergusspolymer in der Regel nicht transparent ist, scheidet eine rein visuelle Inspektion zur Lagebestimmung des Metalleinlegers aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Prüfaufbau vorgestellt, angewendet und validiert, der neben der automatisierten Lagebestimmung des Metalleinlegers im hybriden Prüfkörper auf die Detektion weiterer Informationen über den Zustand des Verbunds zum Prüfzeitpunkt abzielt. Dazu werden Prüfkörper mit verschiedenen Metalleinlegern, Vergussmassen und Alterungszuständen induktiv erwärmt und die resultierende Wärmeausbreitung an der Prüfkörperoberfläche mittels einer Infrarotkamera erfasst. Mathematische Algorithmen zur Bildverarbeitung ermöglichen eine automatisierte Lagebestimmung des Metalleinlegers im Prüfkörper. Darüber hinaus wird ein Verfahren zur Ermittlung von Degradationsmechanismen (Rissbildung in der Vergussmasse, Delamination in der Grenzschicht zum Metalleinleger) auf Basis einer Fourier Transformation der thermografisch erfassten Bildsequenz vorgestellt. Da Delaminationen und Risse in der Vergussmasse wie thermische Barrieren wirken und folglich die Wärmeausbreitung im Prüfkörper stören, werden vorliegenden Fehlstellen in Amplituden- und Phasenbildern erkennbar. Somit steigert die induktiv angeregte Thermografie den auswertbaren Informationsgehalt des hybriden Prüfkörpers.

1. Einführung

Polymere Vergussmassen können in Verbindung mit elektrischen und elektronischen Komponenten wie Bauelementen auf Leiterplatten oder Wicklungen von Elektromotoren eingesetzt werden, um diese vor anspruchsvollen Umgebungsbedingungen zu schützen und deren Leistungsfähigkeit zu steigern [1]. Für eine gezielte Materialauswahl ist die Kenntnis



über das Alterungs- und Versagensverhalten unabdingbar [2]. Da Vergussmassen in der Regel in Kombination mit artungleichen Materialien zum Einsatz kommen, werden hinsichtlich einer möglichst anwendungsnahen Charakterisierung der Vergusspolymere neuartige, hybride Prüfkörper eingesetzt [3]. Diese bestehen, wie in Abbildung 1a und 1b dargestellt, aus einem elliptischem Metalleinleger, der vollständig von einer polymeren Vergussmasse umgeben ist. Die Höhenpositionierung im Verguss erfolgt durch ein definiertes Distanzpapier am Boden der Probe (siehe Abbildung 1b). Der Metalleinleger ist dabei nicht flach, sondern weist eine asymmetrische Formgebung entlang der z-Achse auf, wodurch sich unterschiedliche Materialstärken der Vergussmasse ober- und unterhalb des Einlegers ergeben.

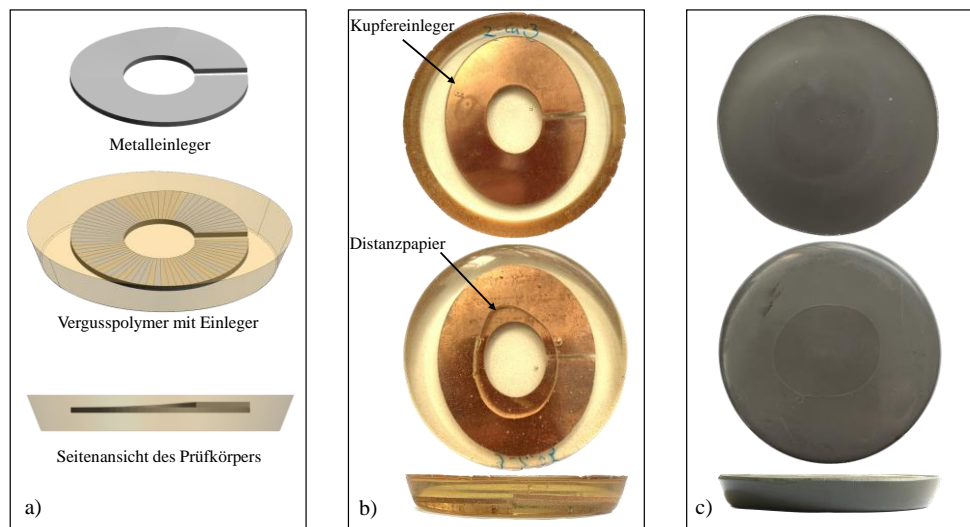


Abb. 1. Hybrider Prüfkörper im CAD-Modell (a), mit transparenter Vergussmasse (b) und mit nicht transparenter Vergussmasse (c).

Die mit einem Durchmesser von 76 mm etwa handflächengroßen Prüfkörper werden manuell hergestellt, indem der Metalleinleger auf einem 5 mm hohen Distanzpapier (vgl. Abbildung 1b) platziert und anschließend mit der Vergussmasse übergossen wird. Im Aushärtungsprozess können sich jedoch bereits Fehlstellen in Form von Einschlüssen oder Abweichungen in der Position des Metalleinlegers ausbilden. Grundsätzlich profitiert das mit dem Prüfkörper umgesetzte Prüfverfahren zur Charakterisierung des Versagensverhaltens von einer hohen Vergleichbarkeit der Prüfkörper innerhalb einer Prüfreihe. Daher ist es vorteilhaft die Lage des Metalleinlegers zu Beginn der Prüfung innerhalb definierter Grenzen sicherstellen zu können. Zudem sollen alle Prüfkörper einer Prüfreihe zu bestimmten Zeitpunkten des Alterungsexperiments zerstörungsfrei in Bezug auf Risse in der Vergussmasse und Delamination in der Grenzschicht zum Metalleinleger untersucht werden, um den Informationsoutput des Experiments zu erhöhen

Da die zu prüfenden Vergussmassen üblicherweise hochgefüllte und damit nicht-transparente Hochleistungsmaterialien (siehe Beispiel in Abbildung 1c) sind, ist eine rein optische Inspektion der Lage des Metalleinlegers ausgeschlossen. Die Computertomographie würde eine exakte Messung der Einlegerposition sowie die Darstellung möglicher Risse ermöglichen, stößt jedoch bei großen Prüfreihe und der Abbildung von Delamination an verfahrensbedingte Beschränkungen. Die Ultraschallprüfung hingegen ermöglicht zwar die Erkennung von Delamination und Rissen, benötigt aufgrund der sehr lokalen Prüfung aber mehrere, verteilte Messungen auf dem gleichen Prüfkörper, um eine Aussage über den

Zustand der Gesamtstruktur zu erzielen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll daher die grundsätzliche Eignung der induktiv angeregten Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung der vorgestellten Prüfstruktur aufgezeigt werden. Diese findet bereits für eine Vielzahl an Materialien und Einsatzfällen Anwendung [4]. Vor diesem Hintergrund wird zunächst das grundlegende Prinzip der induktiven Anregung und der thermografischen Bilderfassung der hybriden Prüfkörper dargestellt. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des konzipierten Prüfaufbaus, bevor abschließend die erzielten Ergebnisse aufgezeigt und bewertet werden.

2. Prinzip

Das Grundprinzip der vorgeschlagenen Messmethodik ist in Abbildung 2 dargestellt. Durch eine pulsartige induktive Anregung wird der jeweilige Metalleinleger im Inneren der Vergussmasse erwärmt. Die resultierende Wärme wird an die Vergussmasse übertragen, sodass das Aufwärm- oder Abkühlverhalten an der Oberfläche des Prüfkörpers mittels einer Infrarotkamera aufgezeichnet werden kann. Die Thermografie-Kamera und die induktive Anregungsquelle befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten des Prüfkörpers. In dieser sogenannten Transmissionsanordnung kann der gesamte Erwärmungsvorgang während der induktiven Anregung erfasst werden. Geeignete Auswertungsmethoden der erfassten Datensätze sollen eine größtmögliche Schnittmenge aus resultierendem Informationsgehalt über den Zustand eines Prüfkörpers sowie Kosten- und Zeitersparnis ermöglichen.

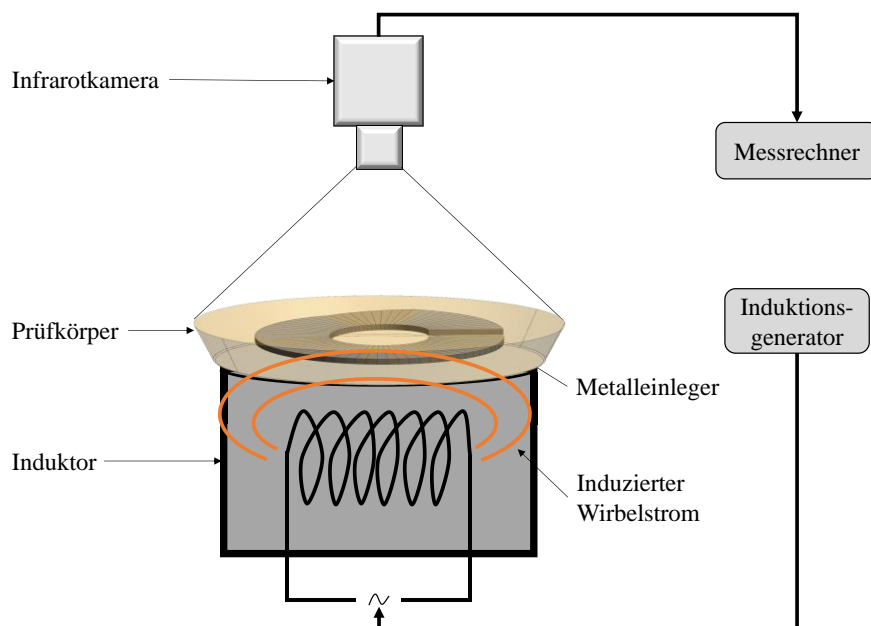


Abb. 2. Grundprinzip der in den Untersuchungen verwendeten Induktionsthermografie.

Die induktive Erwärmung setzt die elektrische Leitfähigkeit eines Materials voraus [4]. Eine von hochfrequenten Strömen durchflossene Spule dient dabei als Induktor und erzeugt ein oszillierendes elektromagnetisches Feld. Dieses Wechselfeld induziert in leitfähigen Werkstoffen oberflächennahe Wirbelströme. Die auftretenden ohmschen Verluste führen schließlich zur Erwärmung des Materials [5]. Neben den elektrischen Effekten kommt es in ferromagnetischen Materialien bei induktiver Anregung zu Hystereseverlusten, die eine zusätzlichen Erwärmung bewirken [6]. Die resultierende Erwärmung ist dabei sowohl von

der Anregungsfrequenz und -dauer als auch von den Materialeigenschaften (Permeabilität und elektrische Leitfähigkeit) abhängig. Da die verwendeten Vergussmassen in der Regel nicht elektrisch leitfähig sind, wird lediglich der elektrisch leitfähige Metalleinleger im Inneren der Vergussmasse durch die induktive Anregung erwärmt. Die Impulsthermografie nutzt dafür lediglich einen kurzen Rechteckimpuls von wenigen Sekunden. Dadurch kommt es zu einer kurzzeitigen Störung des thermischen Gleichgewichtes im Prüfkörper [2]. Diese führt zu einem Wärmefluss vom Metalleinleger über die Grenzschicht an die umgebende Vergussmasse bis zur Prüfkörperoberfläche, wo dieser durch eine Thermografiekamera aufgenommen wird. Mögliche Fehler wirken dabei wie thermische Barrieren, sodass es zeitweilig darunter zu einem lokalen Wärmestau kommt und sich oberhalb niedrigere Temperaturen ergeben. Weiterhin ergibt sich eine Abhängigkeit des Thermogramms von den thermischen Eigenschaften des Kunststoffes sowie der Übergangszahl der Grenzschicht [6].

Die Auswertung der so erhaltenen Sequenzen kann in qualitative und quantitative Methoden unterteilt werden. Bei der quantitativen Thermografie wird die Dichteverteilung der Infrarotstrahlen bzw. die Temperatur gemessen, um eine Aussage über den Zustand einer Struktur zu treffen. Die quantitative Auswertung des Temperaturkontrastes der Bildsequenz kann zur Detektion des Metalleinlegers im Inneren der Vergussmasse herangezogen werden. Eine qualitative Methode stellt die Puls-Phasen-Thermografie dar. Hierbei erfolgt eine Überführung des zeitabhängigen Temperaturverlaufs in den Frequenzbereich, indem für die Gesamtanzahl an aufgezeichneten thermografischen Bildern N eine pixelweise Fouriertransformation durchgeführt wird [8]. Die Fouriertransformation liefert jeweils den Real- und Imaginärteil,

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} T(x, y, t) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = Real_n + Imag_n$$

um damit die Amplitudenwerte A und Phasenwerte ϕ zu berechnen [6].

$$A_n = \sqrt{Real_n^2 + Imag_n^2} \quad \phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Imag_n}{Real_n} \right) \quad (2)$$

So werden die Ergebnisse im Zeitbereich der Impulsthermografie um die Ergebnisse im Frequenzbereich ergänzt. Die Berechnung von Amplituden- und Phasenbildern ermöglicht weiterführende Auswertungen der erfassten Thermografiesequenzen, sodass oberflächennahe Fehler und auch flächige Degradationsfehler wie Delamination an der Grenzschicht bildlich hervorgehoben werden können [5, 7, 8]. Ein Vorteil von Phasenbildern besteht darin, dass sie im Vergleich zu den Sequenzbildern unempfindlich gegenüber einer inhomogenen Beleuchtung, Reflexionen oder der speziellen Geometrie des Objektes sind [4]. Damit die vorgeschlagene Methodik als zerstörungsfrei eingestuft werden kann und die Ergebnisse der eigentlichen Versagensprüfung, aus der die Prüfkörper entnommen werden, nicht beeinflusst wird, sollen lediglich Temperaturen deutlich unterhalb der kleinsten dort verwendeten Prüftemperatur für den Prüfkörper realisiert werden. Diese liegt typischerweise bei 60 °C, womit die maximale Temperatur der Induktionsthermografie auf ca. 50 °C begrenzt wird. Dies muss durch eine geeignete Wahl von Anregungsfrequenz und -dauer sichergestellt werden. Gleichzeitig ergibt sich durch den geringen Temperaturhub der Prüfkörper von ca. 20 K eine Herausforderung bei der Identifikation der beschriebenen Fehler.

3. Konzept und Aufbau

Das konzipierte System zur automatisierten Lagebestimmung von Metalleinlegern in hybriden Prüfkörpern besteht aus einer Erwärmungseinheit, einem radiometrischen Langwellen-Kameramodul vom Typ Lepton 3.5 von FLIR-Systems und einem Computersystem zur Echtzeitdatenerfassung und Auswertung der Thermografiesequenzen. Basierend auf zuvor festgelegten Toleranzwerten erfolgt eine i.O. bzw. n.i.O. Bewertung bezüglich der Metalleinlegerposition im Inneren des Prüfkörpers. Der experimentelle Aufbau zur Untersuchung der Prüfkörper ist in Abbildung 3 dargestellt.

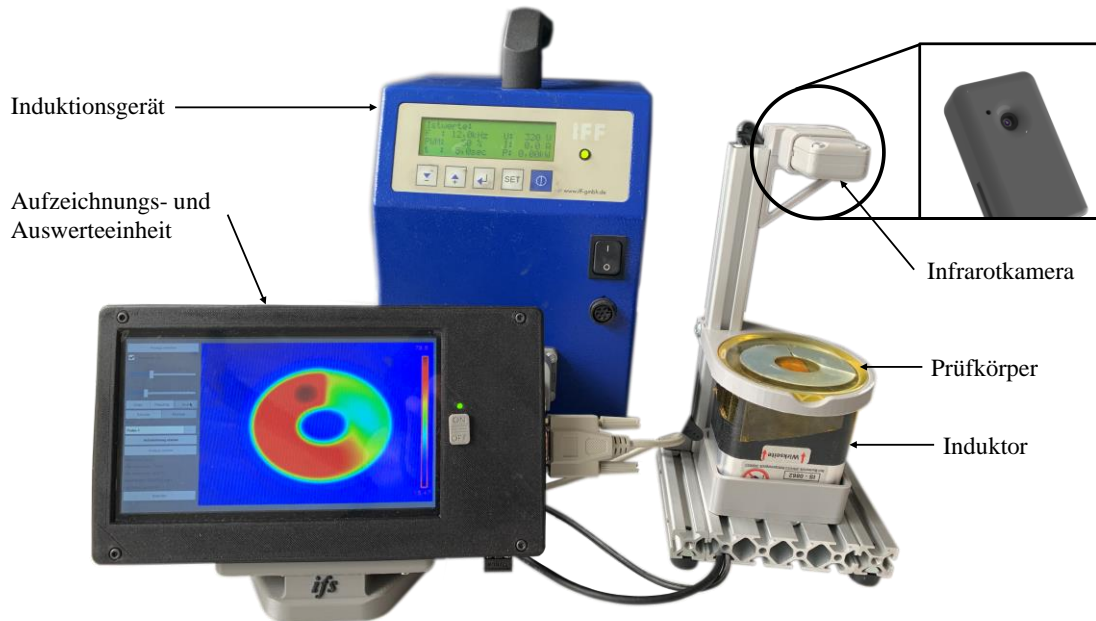


Abb. 3. Versuchsaufbau.

3.1 Infrarotkamera und Induktionsgerät

Das Langwellen-Infrarot-Kameramodul Lepton 3.5 von FLIR wurde aufgrund der besonders niedrigen Kosten und Verbindungsmöglichkeit an nativen Schnittstellen verwendet. Durch das Focal Plane Array (FPA) mit 160 x 120 aktiven Pixeln erfasst das Modul Infrarotstrahlung in einem Spektralbereich von 8 μm bis 14 μm bei einer Bildwiderholrate von 9 Hz. Die thermische Empfindlichkeit beträgt dabei weniger als 50 mK [9]. Zur Ansteuerung und Signalübertragung wird das E/A-Modul PureThermal 2 von Groupgets verwendet, sodass neben der Bildübertragung ebenfalls die Stromversorgung der Infrarotkamera über eine USB-Schnittstelle erfolgen kann. Wie in Abbildung 3 dargestellt, befindet sich das Kameramodul in einem 3D-Druckgehäuse und ist in einer Halterung integriert, sodass stets ein gleichbleibender Abstand zur Prüfkörperoberfläche gewährleistet ist. Das Sehfeld (Field of View) beträgt in horizontaler Richtung 57°, ohne dass eine zusätzliche Optik notwendig ist. Somit ist lediglich ein Mindestabstand zwischen Kamera und Prüfkörperoberfläche von etwa 104 mm erforderlich.

Für die induktive Anregung wird der Mittelfrequenz-Induktionsgenerator EW2 der IFF GmbH in Kombination mit einem rechteckigen Induktor genutzt. Der CT-Scan des Induktors in Abbildung 4b zeigt, dass dieser einen U-förmigen Ferritkern enthält und die Spule 28 Windungen aufweist. So können Anregungsfrequenzen zwischen 10 kHz und 30 kHz

eingestellt werden. Darüber hinaus ist es möglich die Pulsweitenmodulation anzupassen, um so eine gezielte Erwärmungskurve zu ermöglichen. Da allerdings die Auswertung der thermischen Antwort des induktiv angeregten Prüfkörpers auf eine einzelne pulsformige Anregung erfolgt, wird die Pulsweite auf 100 % eingestellt.

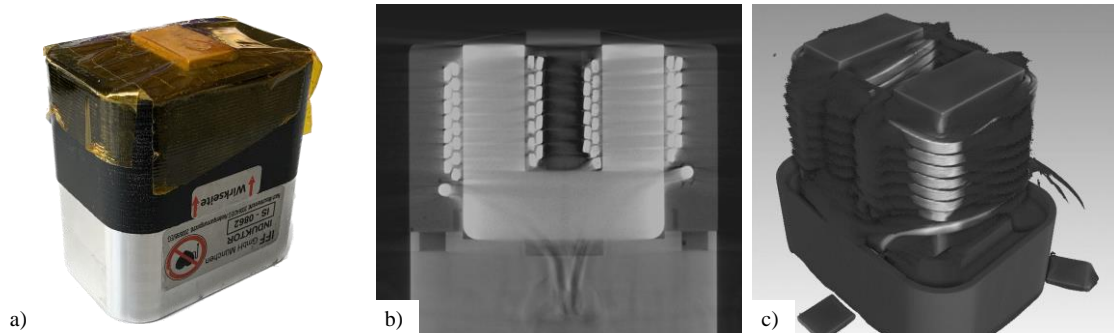


Abb. 4. Induktor IS-0862 a: Realbild b: Schnittdarstellung des CT-Scans. c: CT-Scan.

3.2 Durchführung und Auswertung

Die zur Durchführung der Prüfkörperuntersuchung geeigneten Anregungsfrequenzen und Anregungsdauern wurde im Vorfeld durch eine Parametervariation bestimmt. Als Maximaltemperatur wird wie im Abschnitt „Prinzip“ beschrieben eine Temperatur von 50 °C festgesetzt, bei der ein zu vernachlässigender Einfluss auf den Prüfkörper angenommen werden kann. Tabelle 1 zeigt die Anregungsparameter für die jeweiligen Materialien des Einlegers. Dabei erfolgt die induktive Anregung mit einer Pulsweite von 100 %. Darüber hinaus sind die sich ergebenden Temperaturhübe zwischen der Ausgangstemperatur von etwa 21 °C und der sich einstellenden Maximaltemperatur nach erfolgter induktiver Erwärmung an der Prüfkörperoberfläche aufgezeigt.

Tabelle 1. Verwendete Anregungsparameter.

Material	Anregungsfrequenz [kHz]	Anregungsdauer [s]	Temperaturhub [°C]
Stahl	22	1	28 -33
Aluminium	16	1.2	21 - 26
Kupfer	16	1.5	18 - 24

Die verwendeten Prüfkörper wurden aus vorherigen Experimenten, in denen die Prüfkörper unterschiedlicher thermischen Belastungen ausgesetzt wurden, entnommen. So liegen im Hinblick auf die thermografische Untersuchung neben ungeschädigten auch thermisch gealterte Prüfkörper mit unterschiedlichen Schadensausprägungen vor. Als Vergussmasse wurden verschiedene gefüllte und ungefüllte Vergussmassen verwendet. Die Metalleinleger bestanden aus Stahl (DC01), Kupfer (Cu-ETP) sowie Aluminium (EN-AW 1050A) mit einer Materialstärke von 1,5 mm.

Der Prüfablauf gestaltet sich wie folgt. Der zu untersuchende Prüfkörper wird in die Halteschale gelegt, sodass dieser den Induktor berührt. In Abhängigkeit des Einlegermaterials werden Anregungsfrequenz und -dauer am Induktionsgerät entsprechend der Tabelle 1 eingestellt. Die Aufnahme der Thermografiesequenz beginnt zeitgleich mit der induktiven Anregung, sodass der gesamte Erwärmungsvorgang erfasst wird. Der Prüfkörper befindet sich vor Beginn der induktiven Anregung in einem thermischen Gleichgewicht.

Weiterhin werden während der gesamten Messdauer die Umgebungsparameter konstant gehalten.

4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die erzielten Ergebnisse hinsichtlich einer automatisierten Lagebestimmung des Einlegers sowie der Detektion von Degradationsmechanismen vorgestellt. Die Auswertung der Messungen findet je nach Anwendungsfall als Auswertung der Thermogramme im Zeitbereich oder durch die Puls-Phasen-Methode im Frequenzbereich statt. Durch Anwendung der bereits beschriebenen Fourier-Transformation kann das Phasenbild und das Amplitudenbild ausgewertet werden. Die Transformation kann dabei in Abhängigkeit der Untersuchung für verschiedene Frequenzen variiert werden.

4.1 Erwärmung von Prüfkörpern mit verschiedenen Materialkombinationen

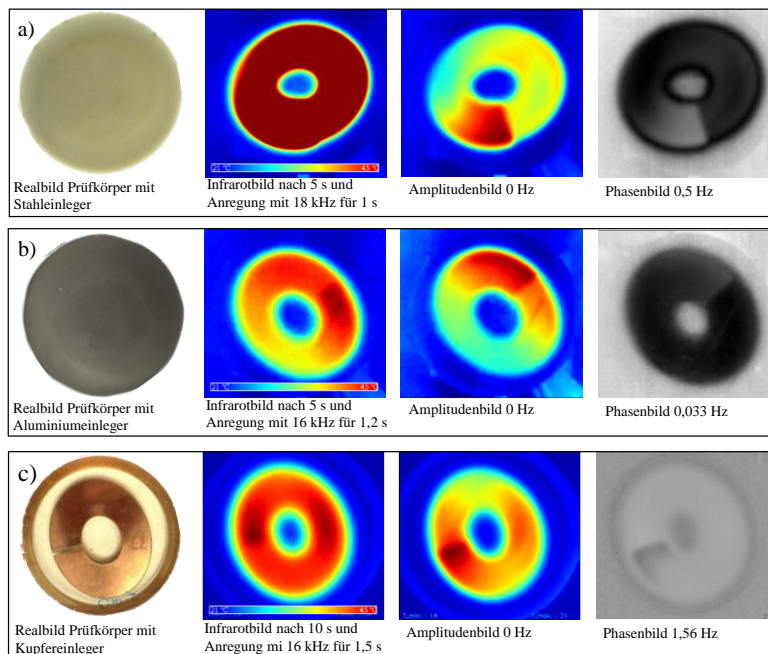


Abb. 5. Thermografische Auswertung von Prüfkörpern mit Stahleinleger (a), mit Aluminiumeinleger (b) und mit Kupfereinleger (c).

Abbildung 5 zeigt die thermografische Untersuchung von Prüfkörpern mit verschiedenen Vergussmassen und Einlegermaterialien, die keine optisch erkennbaren, äußeren Fehlstellen aufweisen. Für die unterschiedlichen Einlegermaterialien (Stahl, Aluminium und Kupfer) wurden die induktiven Anregungsparameter analog Tabelle 1 für die Erwärmung verwendet. Der Metalleinleger zeichnet sich im Infrarotbild stets sichtbar ab, wobei sich jedoch die Schärfe der Einlegerkontur voneinander unterscheidet. Aus Vorversuchen vorliegende Erkenntnisse zur thermischen Leitfähigkeit der Vergussmassen ist bekannt, dass die Vergussmasse C die geringste und Vergussmasse A die höchste Leitfähigkeit aufweist. Eine hohe thermische Leitfähigkeit hat offensichtlich einen negativen Einfluss auf die Abzeichnungsschärfe, da sich der Wärmestrom des Einlegers schneller in alle Richtungen und nicht nur senkrecht zur Oberfläche verteilt.

4.2 Lagebestimmung des Metalleinlegers

Da sich der elektrisch leitfähige Metalleinleger durch die induktive Anregung deutlich schneller erwärmt als das Vergusspolymer, ist anhand der an der Oberfläche des Prüfkörpers aufgenommenen Thermogramme die Lage des Einlegers im Inneren erkennbar. Die Auswertung erfolgt durch Betrachtung der während der Anregungsphase aufgezeichneten Thermografiesequenz im Zeitbereich. Ein in Python unter Nutzung der Programmbibliothek OpenCV programmierter Bildauswertalgorithmus detektiert die Konturen des erwärmten Metalleinlegers im Thermografiebild basierend auf der Temperaturverteilung bzw. den abgebildeten Farbwerten. Aufgrund der unterschiedlichen Materialstärken der Vergussmasse oberhalb des Metalleinlegers bildet sich dessen elliptische Form erst einige Sekunden nach Beginn der induktiven Anregung vollständig im erfassten Wärmebild an der Prüfkörperoberfläche aus. Abbildung 6 zeigt den Stahleinleger im Erwärmungsprozess und im detektierten Zustand.

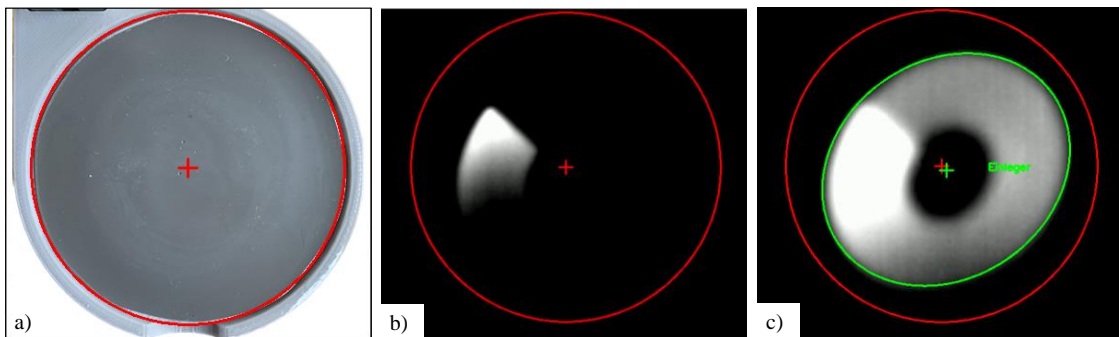


Abb. 6. Lagebestimmung eines Aluminumeinlegers bei einer induktiven Anregungsfrequenz von 16 kHz, a: Realbild, b: Infrarotbild nach 3 Sekunden, c: Infrarotbild nach 12 Sekunden mit detektiertem Metalleinleger.

Da die Infrarotkamera und der Prüfkörper stets den gleichen Abstand zueinander haben, ist es möglich den Umriss und Mittelpunkt (rote Markierungen) des Prüfkörpers festzulegen. Ein grüner Umriss zeigt den detektierten Metalleinleger. Die Bewertung des Lagezustandes erfolgt über die Berechnung der euklidischen Norm zwischen den Mittelpunkten vom Gesamtprüfkörper und dem Metalleinleger. In Bezug auf eine Lagebeurteilung des Metalleinlegers wurde eine Abweichung der Einlegermitte vom Mittelpunkt des Prüfkörpers in Höhe von 2 mm als Grenze für eine Bewertung als in Ordnung (i.O.) festgelegt.

4.3 Delamination und Risse

Für die Auswertung der erfassten Thermogramme in Bezug auf Delamination und oberflächennahe Risse in der Vergussmasse werden aus den Thermografiesequenzen mittels der zuvor beschriebenen Fourier-Transformation einzelne Phasen- und Amplitudenbilder berechnet. Abbildung 7 zeigt neben dem Realbild eines Prüfkörpers mit nicht transparenter Vergussmasse das Thermogramm des induktiv angeregten Aluminumeinlegers. Zusätzlich ist die Auswertung von Amplitudenbild bei 0,7 Hz und Phasenbild bei 1,6 Hz dargestellt. Der Prüfkörper wurde mit einer Anregungsfrequenz von 16 kHz und einer Anregungsdauer von 1,2 Sekunden induktiv erwärmt. Das Thermogramm bildet die Temperaturverteilung an der Oberfläche des jeweiligen Prüfkörpers fünf Sekunden nach Anregungsende ab. Für die Berechnung von Amplituden- und Phasenbild wurden alle Bildsequenzen der Anregungs- und Wärmeausbreitungsphase verwendet.

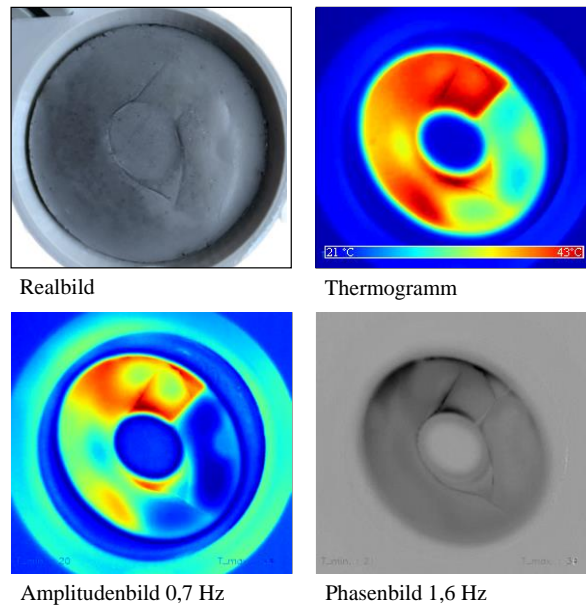


Abb. 7. Thermografische Auswertung von Thermogramm, Amplituden- und Phasenbild am Beispiel eines nicht-transparenten Prüfkörpers mit Aluminium-Einleger.

Im dargestellten Thermogramm des erwärmten Aluminiumeinlegers im Vergusspolymer sind bereits Rissansätze sowie eine inhomogene Wärmeverteilung zu erkennen. Die bereits im Realbild auf der Oberfläche sichtbaren Risse der Vergussmasse sind im berechneten Phasenbild deutlich hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass der untere der beiden Rissanteile noch weiter verläuft, als aus dem Realbild ersichtlich ist. Das Amplitudenbild hebt die vorhandenen Delaminationen zwischen Stahleinleger und Vergusspolymer hervor. Da Delaminationen wie bereits erwähnt als thermische Barriere wirken, ist die Ausbreitung der eingebrachten Wärme an die Prüfkörperoberfläche gehemmt. Folglich resultieren aus vorhandenen Delaminationen zwischen Metalleinleger und Vergussmasse geringere Temperaturen an der Prüfkörperoberfläche. Die aufgrund der Form des Metalleinlegers verschiedenen Dicken der Vergussmasse über dem Einleger führen jedoch bereits zu unterschiedlichen Werten im Thermogramm sowie im Amplitudenbild. Daher führt lediglich die Betrachtung der Homogenität von Flächen mit gleicher Stärke der Vergussmasse (s. Abbildung 8 Bereich I und II) zu einem sinnvollen Ergebnis. Würden diese keine Delamination aufweisen, so läge eine homogene Temperatur auf dieser Fläche vor. In Abbildung 8 ist jedoch eine deutliche Inhomogenität in den Bereichen erkennbar, die auf lokale Ablösungen der Vergussmasse vom Metalleinleger hinweist.

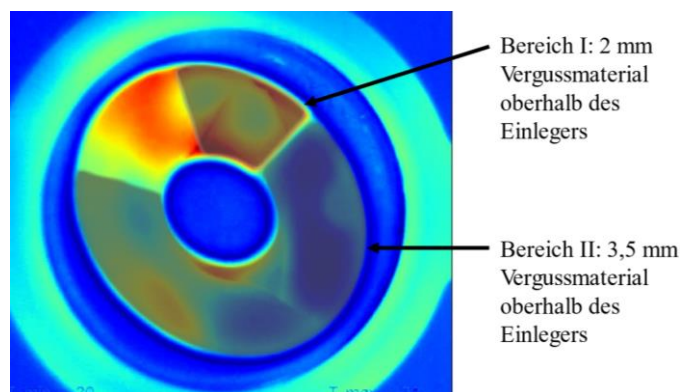


Abb. 8. Markierte Bereiche gleicher Materialstärke oberhalb des Einlegers

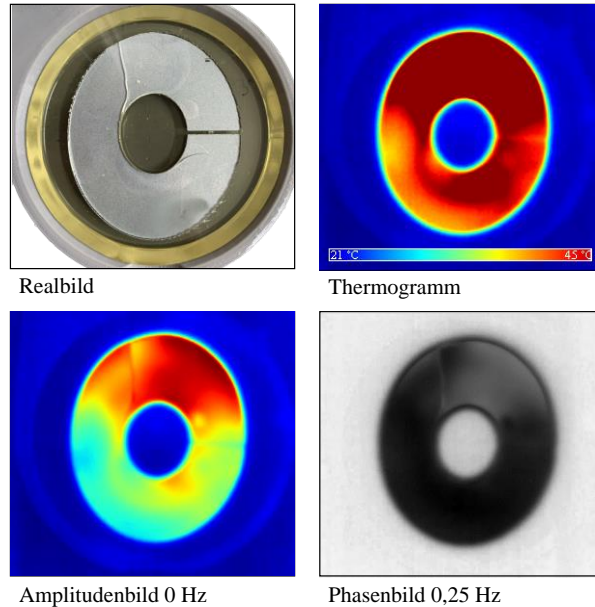


Abb. 9. Thermografische Auswertung eines Prüfkörpers mit transparenter Vergussmasse am Beispiel eines transparenten Prüfkörpers mit Stahl-Einleger.

In Abbildung 9 ist die thermografische Untersuchung eines Prüfkörpers mit transparenter Vergussmasse in Form von Thermogramm, Amplitudenbild bei 0 Hz und Phasenbild bei 0,25 Hz dargestellt. Die thermografische Auswertung eines Prüfkörpers mit transparenter Vergussmasse zeigt jedoch, dass der im Realbild deutlich zu erkennende Riss im Phasenbild nur teilweise zu erkennen ist. Grund dafür ist einerseits der Rissverlauf entlang des Metalleinlegers, sodass dieser von dessen Kontur überdeckt wird und andererseits der geringe eingebrachte Temperaturhub, woraus lediglich ein geringer thermischer Kontrast resultiert. Zudem führt die vergleichsweise geringe Bildaufzeichnungsrage des Infrarotkammermoduls dazu, dass wesentliche Erwärmungssequenzen nicht erfasst werden können. Somit kann zwar gezeigt werden, dass mit diesem Prüfaufbau Defekte in den Prüfkörpern detektierbar sind, jedoch wird auch deutlich, dass der Informationsgehalt stark von der Auswertefrequenz der Fourier-Transformation abhängt.

4.4 Validierung

Um die Ergebnisse der induktiv angeregten Thermografie zu validieren, bieten sich zwei wesentliche Methoden an. Zum einen ist es möglich anhand von Prüfkörpern mit transparentem Vergusspolymer einen optischen Vergleich zu erstellen. Zum anderen kann die thermografische Untersuchung mit einem CT-Scan eines Prüfkörpers abgeglichen werden. In Abbildung 10 ist dazu die Lage eines Metalleinlegers sowohl optisch als auch thermografisch bestimmt.

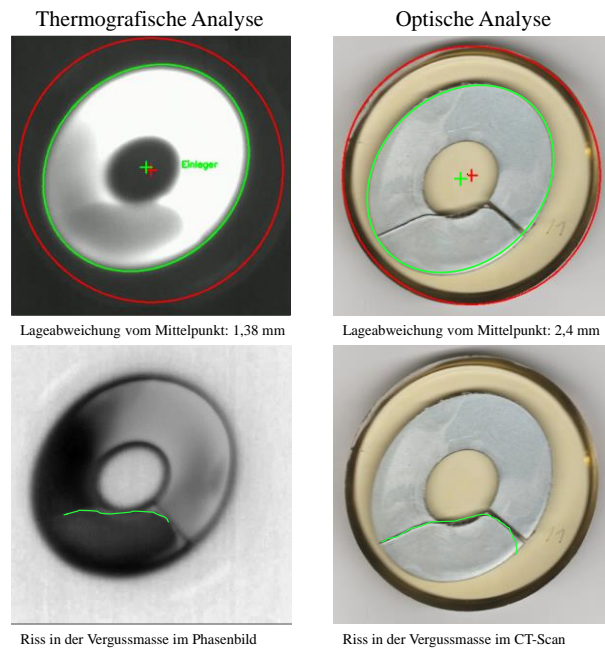


Abb. 10. Vergleich der thermischen Untersuchung (links) mit der optischen Untersuchung (rechts) am selben Prüfkörper.

Für beide Methoden wurde jeweils der selbe Prüfkörper verwendet. Der bestimmte Abstand zwischen den beiden Mittelpunkten liegt bei der thermischen Untersuchung bei 1,38 mm und bei der optischen Untersuchung bei 2,4 mm. Somit liegt eine Differenz der unterschiedlichen Methoden zur Lagebestimmung des Metalleinlegers vor. Ebenso lassen sich an einem Prüfkörper mit transparentem Vergusspolymer Risse und größere Delaminationserscheinungen optisch erkennen. Abbildung 10 zeigt, dass bei der optischen Auswertung Risse sehr gut detektierbar sind, wohingegen die Rissdetektion bei der thermischen Auswertung von der gewählten Frequenz des Phasenbildes abhängig ist. In Bezug auf Delaminationen bietet die thermische Auswertung gegenüber der optischen Auswertung einen deutlichen Vorteil, da diese optisch kaum oder nur bei günstigen Lichtverhältnissen aufzeigbar sind. Jedoch ist auch der Informationsgehalt bezüglich Delaminationen im Amplitudenbild von der Frequenz abhängig, mit der die Fourier-Transformation durchgeführt wird. Daher ist im Vergleich zur optischen Analyse ein deutlich höherer Aufwand notwendig, um potenzielle Fehlstellen im Prüfkörper zu erkennen.

Zur weiteren Validierung kann ein CT-Scan eines Prüfkörpers herangezogen werden. Der Vergleich hinsichtlich der Lagebestimmung ist in Abbildung 11 dargestellt. Der hierfür verwendete Prüfkörper ist jedoch nicht derselbe, wie bei der optischen Auswertung in Abbildung 10. Die Lageabweichung der CT-Auswertung beträgt 3,67 mm und ist damit 0,94 mm größer als bei der thermografischen Auswertung mit 2,73 mm. Die Auswertung hinsichtlich vorhandener Risse im Vergusspolymer gestaltet sich im vorliegenden Fall mittels CT-Scan genauer. Bei der thermografischen Analyse ist der vorhandene Riss hingegen nur sehr schwer darstellbar. Grund dafür ist zum einen die vergleichsweise geringe Auflösung der Infrarotkamera und zum anderen die rapide Wärmeausbreitung in der Vergussmasse bei nur kleinen Temperaturhüben.

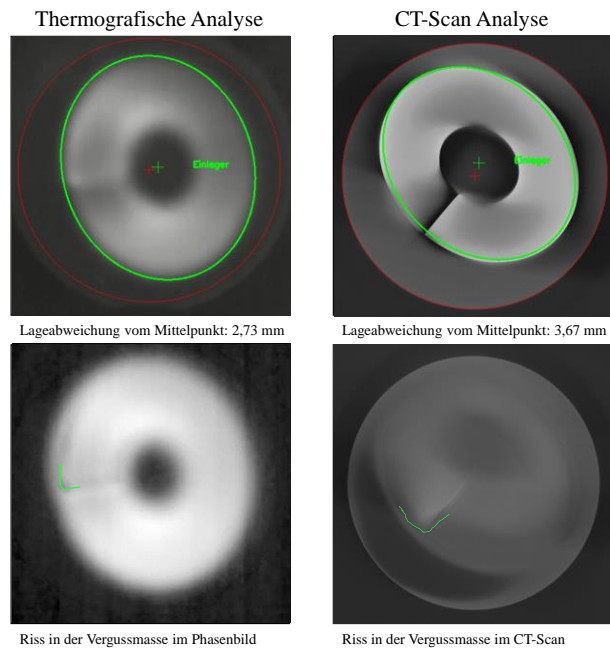


Abb. 11. Vergleich der thermischen Untersuchung (links) mit der computertomografischen Untersuchung (rechts) am selben Prüfkörper.

Tabelle 2 zeigt die ermittelten Lageabweichungen der unterschiedlichen Messmethoden. Es ist erkennbar, dass die Positionsbestimmung auf Basis der thermografischen Auswertung zu einer geringeren Mitte-Mitte-Abweichung als bei der optischen oder der CT-Scan Auswertung führt, die beide als mögliche Referenzmessung angesehen werden können. Dies könnte auf eine zusätzliche laterale Wärmeausbreitung in der Vergussmasse zurückzuführen sein, die zu einem Verschwimmen des thermischen Umrisses des Metalleinlegers und damit zu einer gestörten Detektion mittels der implementierten Bildauswertung führt. Die Lageabweichung des Einlegers vom tatsächlichen Wert wird somit durch die thermisch basierte Bestimmung tendenziell um etwa 1 mm unterschätzt. Praktisch gesehen könnten demnach Prüfkörper als i.O. bewertet werden, die eigentlich als n.i.O. anzusehen sind (siehe Tabelle 1, Vergleich 1). Ausreißer mit sehr hohen Abweichungen können wiederum wohl korrekt aussortiert werden. Da die ermittelte Differenz (ca. 1 mm) deutlich kleiner als die erlaubte Abweichung ist (max. 2 mm) erscheint eine darauf basierende i.O./n.i.O. Bewertung der Prüfkörper mit der vorgestellten Mess- und Auswertmethodik realisierbar. Für eine genauere Aussage auf Basis von Mittelwert und Standardabweichung müssen in weiteren Untersuchungen mehr Prüfkörper analysiert werden.

Tabelle 2. Ermittelte Lageabweichung der verschiedenen Methoden.

Vergleichsmethode	Abweichung thermisch bestimmt [mm]	Abweichung optisch bzw. im CT-Scan [mm]	Differenz [mm]
Thermisch zu optisch	1,38	2,40	1,02
Thermisch zu CT	2,73	3,67	0,94

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die grundsätzliche Eignung der induktiv angeregten Thermografie für die zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung einer neuartigen, hybriden Prüfstruktur aufgezeigt. Die dargelegten Ergebnisse demonstrieren, dass eine automatisierte Lagebestimmung eines Metalleinlegers innerhalb einer nicht-leitfähigen, polymeren Vergussmasse ermöglicht wird. Die geringere Genauigkeit der Lagebestimmung gegenüber dem CT-Scan wird mit der einfachen und schnellen Durchführung aufgewogen, die auch bei großen Prüfreißen eine Untersuchung jedes Prüfkörpers ermöglicht. Eine Beeinflussung des eigentlichen Alterungsexperiments konnte durch die geringe Erwärmung der Prüfkörper vermieden werden. Trotz des geringen Temperaturhubs erweist sich die Induktionsthermografie weiterhin als nützliche Methode zum Nachweis von vorhandenen Fehlstellen bzw. Degradationen, die auf der der Thermografie-Kamera zugewandten Seite des Metalleinlegers liegen. Insbesondere kann durch Auswertung von Amplituden- und Phasenbildern ein verbesserter Kontrast von Fehlstellen erzielt werden, um diese gezielt lokalisieren zu können. Zudem ist auch gezeigt worden, dass sich selbst mit einer vergleichsweise günstigen Infrarotkamera umfangreiche Ergebnisse mit hohem Informationsgehalt erzielen lassen. Eine automatisierte Detektion der Fehlstellen stellt jedoch eine Herausforderung dar, da der Informationsgehalt von Amplituden- und Phasenbildern stark von der Frequenz der verwendeten Fourier-Transformation abhängig ist und diese zunächst bestimmt werden muss. Auch die Detektion von Rissen in der Vergussmasse, die deutlich unterhalb der Oberfläche liegen, gestaltet sich schwierig. Im Rahmen weiterführender Untersuchungen soll der Informationsoutput der thermografischen Analyse der hybriden Prüfkörper zusätzlich gesteigert werden. So soll beispielsweise die Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit des Vergusspolymers basierend auf der aufgenommenen Thermografie-Bildsequenz ermittelt werden.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Life Cycle Technologien für hybride Strukturen – LCT“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „Forschungscampus - öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ (Förderkennzeichen 02P18Q700) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Referenzen

- [1] Polytec PT GmbH: *Klebstoffe und Vergussmassen für Elektromotoren*. Karlsbad, 2018
- [2] Wiebel S.: *Untersuchung zur thermischen Langzeitstabilität von Epoxidharzen der elektrischen Isoliertechnik in Abhängigkeit von oxidativen Umgebungseinflüssen*. Darmstadt, 2012
- [3] Gundlach C., Hartwig S.; Mannig M.; Menzel M.; Smatt T.; Dilger K.: A Specimen for Evaluating Potting Materials in Functional Integrated Design Solutions. Proceedings Hybrid - Materials and Structures, 2018
- [4] Hönl F.: *Beitrag zur Auslegung von Spulengeometrien für die induktive Thermografie an Stahl und CFK in Reflexionsanordnung*. Berlin, 2017
- [5] Zöcke C.; Langmeier A.: *Aktive Thermografie mit Phasenauswertung praktische Anwendung im Bauwesen*. EADS-Innovation Works, München, 2008
- [6] Krell T.; Wolfrum J.: *Puls-Phasen-Thermografie an definiert geschädigten und reparierten Faserverbundbauteilen*. Thermographie-Kolloquium, 2007
- [7] Arndt R.: *Rechteckimpuls-Thermografie im Frequenzbereich*. Berlin, 2007

- [8] Schwarz M.: *Multimodale zerstörungsfreie Charakterisierung der Grenzflächen von Metall-CFK-Hybridstrukturen*. Saarbrücken, 2019
- [9] Teledyne FLIR LLC.: *Lepton 3 Series* Santa Barbara, 2022