

# Möglichkeiten und Grenzen der Lock-In-Thermografie zur Prüfung von Faserverbund-Integralholmen von Flugzeugtragflächen

Sebastian LOTZ<sup>1</sup>, Julia FIEBIGER<sup>1</sup>, Philipp JATZLAU<sup>1</sup>, Christian U. GROBE<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

**Kurzfassung.** Der Beitrag beschreibt Messungen mit Lock-In-Thermografie, die im Rahmen einer Kooperation mit einem süddeutschen Trainings- und Sportflugzeughersteller an Faserverbund-Integralholmen von Tragflächen durchgeführt wurden. Ziel war es, die Qualität der Bauteile auch nach der erfolgten Umstellung von GFK zu CFK und dem neu eingeführten VAP®-Verfahren (vacuum assisted process) zu gewährleisten. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen dienen als Grundlage für den Aufbau eines robusten Verfahrens zur Qualitätssicherung während des Produktionsprozesses. Die thermografischen Messungen wurden am Firmenstandort mit einer ungekühlten Mikrobolometer-Infrarotkamera im Spektralbereich zwischen 7,5 und 13  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Der Detektor der Kamera war mit 640 x 480 Pixeln ausgestattet und weist eine thermische Empfindlichkeit von ca. 30 mK auf. Neben der Thermografie wurden auch weitere zerstörungsfreie Prüftechniken wie Ultraschall (Impuls-Echo, Phased Array, Pitch-Catch, Resonanz) und Mikrowellen an denselben Probekörpern angewendet. Der Vergleich mit den genannten Verfahren hinsichtlich objektiver Kriterien wie Eindringtiefe, detektierbare Fehlergröße, Messdauer sowie ökonomischer Aspekte zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Lock-In-Thermografie auf. Die Ergebnisse der Messungen wurden in zwei studentischen Arbeiten dokumentiert [1, 2].

## 1. Einführung

Steigende Energiekosten und Umweltaspekte bringen Flugzeughersteller immer mehr dazu, das Gewicht ihrer Flugzeuge zu reduzieren. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit kommen daher zunehmend kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz. Um den Qualitätsanforderungen an Produkt und Produktionsprozess auch nach der Umstellung auf neue Werkstoffe gerecht zu werden, sind entsprechende zerstörungsfreie Prüfmethoden erforderlich. Der Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München hat daher in Kooperation mit einem süddeutschen Trainings- und Sportflugzeughersteller eine Untersuchung zur qualitativen und wirtschaftlichen Bewertung verschiedener Verfahren zur Prüfung von Flugzeugbauteilen durchgeführt, wobei die Lock-In-Thermografie in diesem Beitrag im Mittelpunkt steht. Prüfobjekte waren hierbei verschiedene Probekörper aus CFK und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) sowie ein vollständiger CFK-Integralflügelholm eines Sportflugzeugs.



## 2. Beschreibung des Prüfobjekts Faserverbund-Integralholm

Der Integralholm besteht aus einem inneren Gewebe, zwei Gurten und einer äußeren Hülle, die sowohl das Gewebe als auch die Gurte abdeckt. Ein Querschnitt durch den Holm ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Holm ist eine Integralkonstruktion, die mit dem VAP-Verfahren hergestellt wurde, d. h. alle Komponenten wurden auf einer steifen Unterschale fixiert und zeitgleich mit dem Harzsystem infiltriert. Die Schichtdicke der einzelnen Holmbestandteile nimmt mit zunehmendem Abstand von der Mitte des Flugzeugs bis zu den Spitzen der Tragflächen ab. Der untersuchte Flügelholm ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Region of Interest (ROI) befindet sich zwischen den roten Markierungen [1].

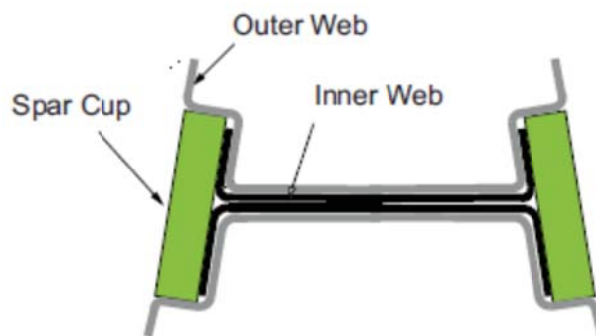


Abbildung 1: Querschnitt durch den Faserverbund-Integralholm.

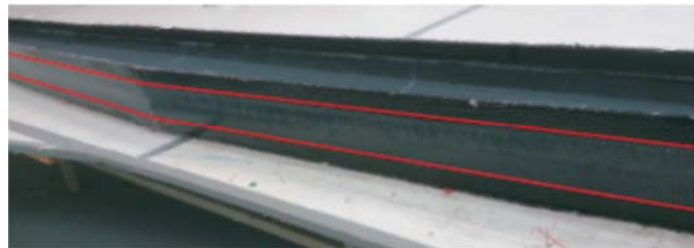


Abbildung 2: Prüfobjekt Flügelholm.

## 3. Durchführung der Messungen

### 3.1 Voruntersuchungen

Im Vorfeld der Messungen am Integralflügelholm wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, um die für Material und Aufbau geeigneten Messparameter wie Lock-In Frequenzen und Anzahl von Einschwing- und Messperioden zu ermitteln. Hierzu wurde auf die Arbeiten von Perterer [3] und Spießberger [4] zurückgegriffen, deren umfangreiche Untersuchungen als Grundlage für die Messungen an eigens hergestellten Proben aus CFK und GFK dienen. Bei den Proben handelt es sich sowohl um handlaminierte als auch nach dem VAP-Verfahren hergestellte quaderförmige Lamine, die neben typischen Produktionsfehlern auch künstlich eingebrachte Merkmale wie verdeckte Flachbodenbohrungen, Delaminationen sowie trockene Faserbündel enthalten [1]. Aus den Voruntersuchungen können die in Abbildung 3 zusammengefassten Lock-In Parameter abgeleitet werden.

OTvis	
☐ Measurement	
Lockin frequency [Hz]	0.05 0.035 0.005
Condition periods	1 1 0
Acquisition periods	5 5 3

**Abbildung 3:** Lock-In Parameter zur Untersuchung des Flügelholms.

### 3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau in der Produktionshalle des Partnerunternehmens ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Flügelholm liegt hier auf dem unteren Gurt auf. Während des Flugs wird fast die gesamte Last von den beiden Gurten oben und unten am Holm getragen, während das Gewebe im Zentrum für die nötige Steifigkeit sorgt. Die größte Belastung tritt dabei in der Mitte des Holms auf, wo der Flugzeugrumpf sitzt und die Gurte die maximale Dicke aufweisen. Daher werden die Messungen auf die inneren fünf Meter der beiden Gurte beschränkt.



**Abbildung 4:** Messaufbau in der Fertigungshalle des Partnerunternehmens.

Die Messtechnik setzt sich aus der ungekühlten Mikrobolometerkamera Flir SC 660, einem 2kW Halogenscheinwerfer sowie einem Lock-In-Modul und der Software DisplayIMG von Edevis zusammen. Aufgrund der Länge des Bauteils wird der Holm für die Messungen in gleich große Abschnitte mit einer Länge von je 0,25m eingeteilt. In Abbildung 5 ist die Markierung der Segmente neu und zehn abgebildet. Der Abstand zwischen IR-Kamera und Messobjekt beträgt 0,7m und wird nach jeder Messung zusammen mit der Schärfe des IR-Objektivs nachjustiert. Für die Messungen wird der Holm so positioniert, dass die IR-Kamera senkrecht zum Gurt steht (vgl. Abbildung 5).

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Lock-In-Thermografie

Abbildung 6 zeigt neben der Position der untersuchten Gurtsegmente am Holm ausgewählte Ergebnisse der optisch angeregten Lock-In-Thermografie (OLIT) im Phasenbild sowie ein dazugehöriges Foto.

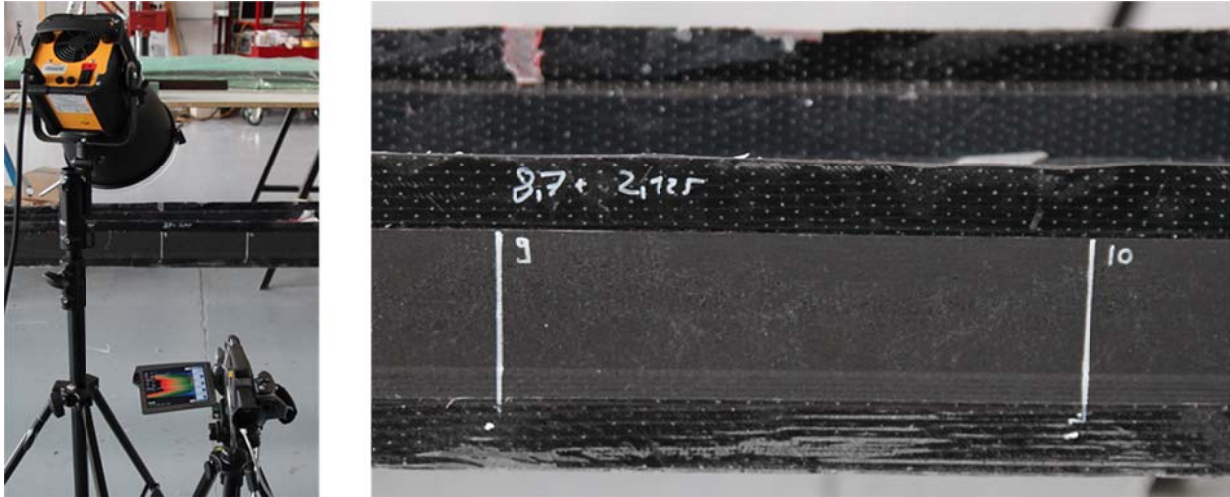


Abbildung 5: Messaufbau der Lock-In-Thermografie (links) und der Holm in der Nahaufnahme (rechts).

In den Phasenbildern ist zu erkennen, dass sich die geometrische Auflösung zu Segment zehn hin verbessert. Da eine schlechte Fokussierung der Kamera gemäß der Versuchsdurchführung ausgeschlossen werden kann, wird die Änderung der Auflösung der Porosität des Materials zugeschrieben. Für die Infiltrierung des Geleges werden sechs Harzeinlässe genutzt: jeweils zwei an den Enden und zwei in der Mitte des Holms. Nahe den Einlässen kann aufgrund besserer Durchtränkung eine geringere Porosität vorliegen, was zu einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit in diesen Bereichen führt. Liegt jedoch ein hoher Porositätsgrad vor, staut sich die Wärme an der Oberfläche und führt zu einer schlechteren Auflösung der Phasenbilder. Die blauen Ellipsen in Abbildung 6 kennzeichnen Bereiche, in denen die Auflösung merklich abgenommen hat (Segment 4) bzw. Bereiche, ab denen die zunehmende Wandstärke des Gurts kein Erkennen des darunterliegenden Versteifungsgewebes mehr erlaubt (Segment 7).

#### 4.2 Vergleich mit anderen ZfP-Verfahren

Neben OLIT werden im Rahmen des Projekts zur Untersuchung des Faserverbund-Integralholms weitere ZfP-Verfahren eingesetzt, unter anderem Ultraschall-Impuls-Echo mit Einzelschwinger (Epoch) und Phased-Array (Omniscan) sowie Mechanische Impedanz-Analyse, Pitch-Catch-Verfahren und Resonanzanalyse (Bondmaster). Basierend auf den hierbei gewonnenen Messdaten wird eine qualitative Nutzwertanalyse nach Eversheim & Schuh [5] durchgeführt, deren Ergebnis in Tabelle 1 dargestellt ist. Bei der Nutzwertanalyse werden die verschiedenen Messverfahren anhand definierter Kriterien wie beispielsweise Eindringtiefe, Lokalisierbarkeit und Messdauer verglichen. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien ist größtenteils subjektiv und kann sich je nach Prüfaufgabe, Anforderungen oder Erfahrung des Prüfers unterscheiden.

Neben der Nutzwertanalyse wird im Rahmen des Projekts auch eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt. Diese ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Die hier aufgeführten Werte basieren mehrheitlich auf dem Leistungsverzeichnis und den Erfahrungen des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung an der Technischen Universität München und sind nicht als allgemeingültig anzusehen. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegt die Thermografie bezüglich der Gesamtkosten pro Messung deutlich unterhalb der anderen eingesetzten Verfahren. Dies ist auf die vergleichsweise hohe Fläche zurückzuführen, die gleichzeitig untersucht werden kann, was einen signifikanten Einfluss auf die Messdauer hat.



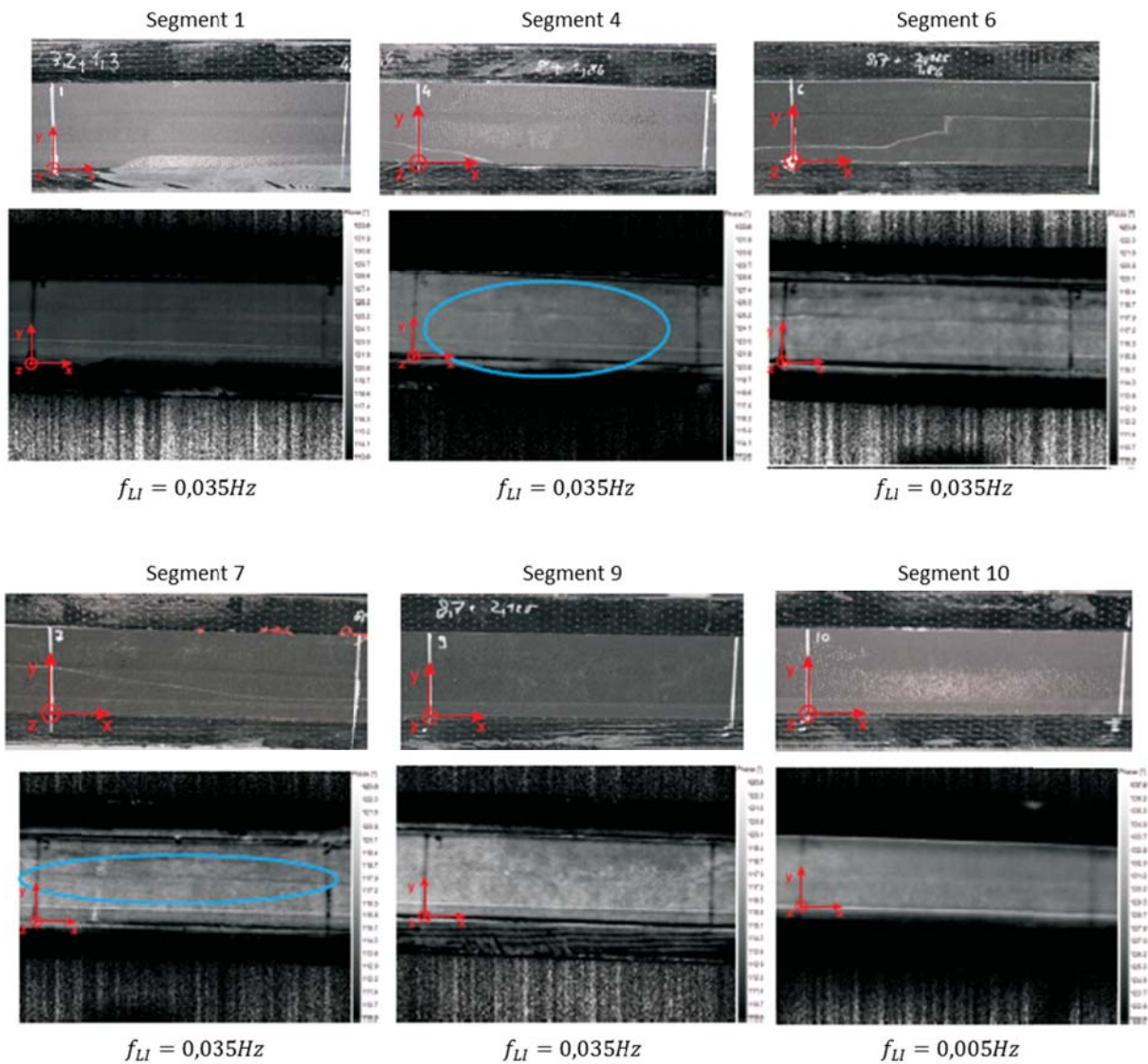
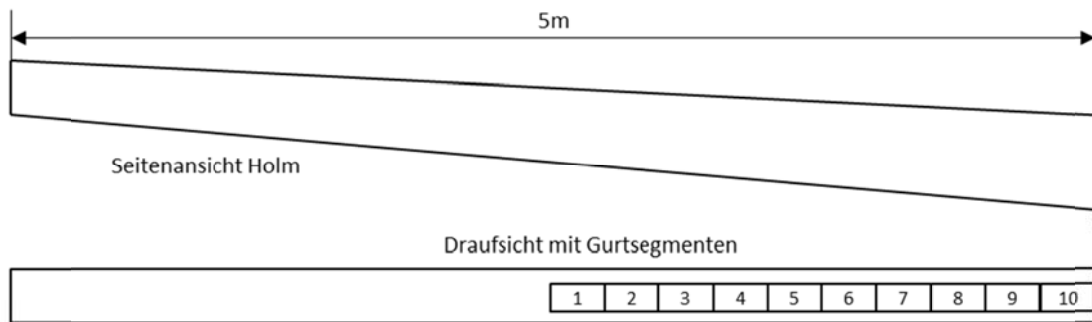


Abbildung 6: Positionen, Fotografien und Phasenbilder ausgewählter Gurtsegmente des Flügelholms.

**Tabelle 1:** Vergleich verschiedener ZfP-Verfahren nach Gewichtung:

Zielkriterien	absolutes Gewicht	Epoch	OmniScan	BondMaster	OLIT
auf lösbare Fehlergröße [mm]	0.12	0.96	0.96	0.96	0.6
Eindringtiefe [mm]	0.2	1.6	1.6	0.8	0.8
Lokalisierbarkeit	0.08	0.8	0.72	0.24	0.48
Einfluss der Materialqualität	0.12	0.36	0.36	0.6	0.36
Umgebungseinflüsse	0.09	0.9	0.9	0.9	0.45
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit	0.09	0.45	0.18	0.63	0.9
Reproduzierbarkeit	0.06	0.6	0.6	0.12	0.6
Menüführung	0.01	0.09	0.08	0.03	0.1
Datenverarbeitung/-speicherung	0.03	0.21	0.3	0.03	0.3
Messdauer [min/175cm <sup>2</sup> ]	0.06	0.18	0.6	0.18	0.48
auf einmal gemessener Bereich [cm <sup>2</sup> ]	0.06	0.12	0.48	0.12	0.6
Zeitaufwand für Prüfer [min/175cm <sup>2</sup> ]	0.08	0.24	0.8	0.24	0.8
Nutzwerte (Summe)	1	6.51	7.58	4.85	6.47

**Tabelle 2:** Vergleich verschiedener ZfP-Verfahren nach Kosten:

	Epoch	OmniScan	Bondmaster	OLIT mit Software
Anschaffungskosten [€]	8000	50000	25000	40000
Nutzungsdauer [Jahre]	10	10	10	10
Gesamtanzahl Messungen	300	300	300	300
Fixe Kosten pro Messung [€]	26.67	166.67	83.33	133.33
Messdauer [Stunden]	120	20	120	8
Personalkosten [€/Stunde]	50	50	50	50
Variable Kosten pro Messung [€]	6000	1000	6000	400
Gesamtkosten pro Messung [€]	6026.67	1166.67	6083.33	533.33

## 5. Diskussion

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Untersuchung eines Faserverbund-Integralholms mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren mit besonderem Fokus auf die optisch angeregte Lock-In-Thermografie. Bei den Messungen konnte gezeigt werden, dass die Anwendbarkeit der OLIT stark von der Qualität des Prüfobjekts abhängt. Insbesondere eine

hohe Porosität von CFK-Werkstoffen wirkt sich negativ auf die Messqualität aus. Die Thermografie hat jedoch auch eine Reihe von Vorteilen, die sich im direkten Vergleich mit anderen Prüfverfahren bemerkbar machen. Hierbei sind vor allem der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit, der gleichzeitig messbare Bereich sowie der Zeitaufwand für den Prüfer zu nennen.

Bei der Konfiguration eines Qualitätssicherungssystems auf Basis von Zerstörungsfreien Prüftechniken sollten frühzeitig die relevanten Randbedingungen geklärt werden. Dazu gehören die Bestimmung relevanter Defektgrößen (Effect of Defect) aber auch der Auffindwahrscheinlichkeit der Verfahren (PoD, Probability of Detection). Allerdings spielen Aspekte wie die Taktzeit bei der Fertigung in der Massenproduktion oder die reinen Messkosten eine wichtige Rolle. Gelingt die Auswahl und Kombination von Verfahren, so führt dies in der Regel zu einem effizienteren Prüfeinsatz und zu einer Reduzierung der Produktionskosten [6].

## Referenzen

- [1] Lotz, S.: *Possibilities and Limits of Non-Destructive Testing applied to Wing Spars made of CFRP and GFRP on a Basis of Electromagnetic Waves*. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, 2014.
- [2] Fiebiger, J.: *Möglichkeiten und Grenzen von ZfP-Prüfverfahren auf Basis von elastischen Wellen für Faserverbund-Integralholme von Flugzeugtragflächen*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Technische Universität München, 2014.
- [3] Perterer, M.: *Schadensidentifikation und –bewertung von CFK-Bauteilen mittels phasenmodulierter Thermographie*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [4] Spießberger, C.: *Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2012.
- [5] Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management (Betriebshütte)*, 7. Auflage. Berlin: Springer 1996.
- [6] Große, C.: *Bausteine für eine moderne Zerstörungsfreie Prüfung von Faserwerkstoffverbunden*. Tagungsband 4. Würzburger Tagung Innovative zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für moderne Kunststoffe, Süddeutsches Kunststoff-Zentrum, 2014, 15 Seiten.