

Zuverlässigkeitsstudie der Aktiven Thermografie bei der Prüfung von Verbundwerkstoffen mittels Probability of Detection Analyse

Jürgen GRUBER¹, Karl Heinz GRESSLEHNER¹, Jakov ŠEKELJA², Günther MAYR¹
¹ FH Oberösterreich Forschungs und Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich
² FACC Operations GmbH, Ried im Innkreis, Österreich

Kurzfassung. Die Aktive Thermografie findet eine immer größere Anwendung bei der zerstörungsfreien Prüfung von Luftfahrtkomponenten. Ziel dieser Arbeit ist es, das Nachweisvermögen von Fehlern zu ermitteln, welche bei der Prüfung von Verbundwerkstoffen an bestimmten Prüfmustern (Fehlerarten) mittels Aktiver Thermografie für verschiedene Auswertemethoden untersucht wurden. Dazu wurden die Temperatur- Zeitverläufe von der Vorder- und Rückseite der untersuchten Proben sowohl im Zeitbereich wie auch im Frequenzbereich mittels Thermographic Signal Reconstruction (TSR), Linear Diffusivity Fitting (LDF) und Fast Fourier Transformation (FFT) ausgewertet.

Zur Quantifizierung der Detektierbarkeit eines Fehlers wurde als Kenngröße der Signal Hintergrund Kontrast (Signal Background Contrast, SBC) eingeführt. Das Signal ist dabei jener Wert (Schwellenwert), über welchem 75% der Pixelwerte der Fehlstelle liegen. Durch diese Definition des Schwellenwertes ist der SBC Wert hoch genug, um sicherzustellen, dass damit eine hohe Auffindwahrscheinlichkeit (Probability of Detection, POD) der Fehler gegeben ist.

Für die statistischen Untersuchungen wurden Standardprüfkörper aus kohlefaserverstärktem Kunststoff mit künstlich eingebrachten Fehlern, welche unterschiedliche Größen und Tiefenlagen haben, hergestellt. Dadurch reicht die Auffindwahrscheinlichkeit von „nicht auffindbar“ bis „sicher auffindbar“. Die eingebrachten Fehlstellen sind typisch für dieses Materialsystem und treten häufig in der Luftfahrt auf.

Die Prüfergebnisse der einzelnen Prüfer wurden als hit / miss Daten gemäß Military Handbook MIL-HDBK-1823 mit dem Softwarepaket mh1823 mittels POD Analyse ausgewertet. Die POD Kurven wurden für die verwendeten Auswertemethoden der Aktiven Thermografie erstellt und daraus, für eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90% und einem Konfidenzintervall von 95% die Grenzen der Auswertemethoden ermittelt.

1. Einführung

Aktive Thermografie ist eine berührungslose, bildgebende und schnelle Methode zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (engl. non destructive testing, NDT) und daher für den industriellen Einsatz (insbesondere für die Luftfahrtindustrie) geeignet. Damit sie als akzeptierte Prüfmethode eingesetzt werden kann, ist es unabdinglich die Zuverlässigkeit im Zusammenhang mit den Auswertemethoden nachzuweisen. Es ist üblich die

Auffindwahrscheinlichkeit (Probability Of Detection, POD) eines Fehlers (einer Fehlerart) als Maß für die Zuverlässigkeit einer Methode heranzuziehen.

Für die thermografischen Untersuchungen wurden Probenplatten aus kohlefaserverstärktem Kunststoff mit künstlich eingebauten Fehlern unterschiedlicher Größen und Tiefen hergestellt. Aufgrund der Größe und Fehlertiefe der eingebauten Fehler reichen diese von „nicht auffindbar“ bis „sicher auffindbar“.

Um eine POD Analyse durchführen zu können ist eine objektive Fehlercharakterisierung notwendig. Zu diesem Zweck wurde als charakteristische Größe der Signal Hintergrund Kontrast (Signal Background Contrast, SBC) eingeführt, welcher in etwa dem Signal Rausch Verhältnis in der Messtechnik entspricht. Für die Festlegung des SBC Wertes wurde eine Vorgehensweise aus der Ultraschallprüfung adaptiert.

Die Ergebnisse der Thermografiemessungen wurden als Diffusionszeit- und Phasenkontrastbilder einerseits von einem Prüfer, der aufgrund des Fehlerplans Kenntnis von Anzahl und Position der Fehlstellen hatte, und andererseits von neun verschiedenen Prüfern, welche nur die möglichen Fehlergrößen und Orientierungen kannten, ausgewertet. Allgemein können Daten auf zwei Arten behandelt werden. Entweder als kontinuierliche Signal Antwort (continuous signal response) oder als diskrete gefunden / nicht gefunden Antwort (engl. hit / miss). Im letzten Fall sind die Daten binär und enthalten nur Nullen oder Einsen, die eine Nicht-Detektion oder Detektion bezeichnen [1, 2]. Aus den Ergebnissen der Prüfer wurden solche hit / miss Matrizen erstellt und als Input für die anschließende POD Analyse verwendet.

2. Experiment und Auswertung

2.1 Probenkörper

Zur Durchführung dieser Arbeit wurden fünf Platten (Probenkörper) aus kohlefaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Jede dieser Platten hat vier Teilbereiche unterschiedlicher Dicke. Diese Teilbereiche bestehen aus 6, 12, 18 und 24 Lagen, wobei jede Lage eine Dicke von etwa 0,22 mm aufweist. In jedem dieser Teilbereiche wurden vier bis sieben künstliche Fehler, mit einer Größe von 5 x 5 mm, 5 x 10 mm oder 10 x 10 mm, an zufällig ausgewählten Positionen und in unterschiedlichen Tiefenlagen platziert. Fehler der Größe 5 x 10 mm können stehend, liegend oder $\pm 45^\circ$ zur Außenkante gedreht sein. Abbildung 1 zeigt den typischen Aufbau eines Probenkörpers mit den Positionen und Dimensionen der einzelnen Fehlstellen (grau). Die Nummern neben den Fehlstellen geben an zwischen welchen Lagen der Fehler eingebaut wurde und sind somit ein Maß für die Tiefenlage. Die Zählung beginnt an der Oberfläche, weshalb eine höhere Nummer einer größeren Tiefe entspricht. Diese grafische Darstellung wurde auch als Fehlerplan genutzt.

Zur Herstellung der künstlichen Fehler wurden entsprechend große Folienstücke aus Teflon so gefaltet und verklebt, dass darin eine kleine Menge Luft eingeschlossen wird. Diese Fehler sollen Delaminationen in hergestellten Bauteilen simulieren. Die Fehler wurden hinsichtlich ihrer Größe und Tiefe so in die Probenkörper eingebaut, dass damit die Auffindwahrscheinlichkeit von „nicht auffindbar“ bis „sicher auffindbar“ abgedeckt ist.

Die Fehler in den 24 Lagen dicken Teilbereichen konnten für die POD Analyse nicht verwendet werden, da aufgrund der geringen Signalstärken keine SBC Wert Bestimmung möglich war.

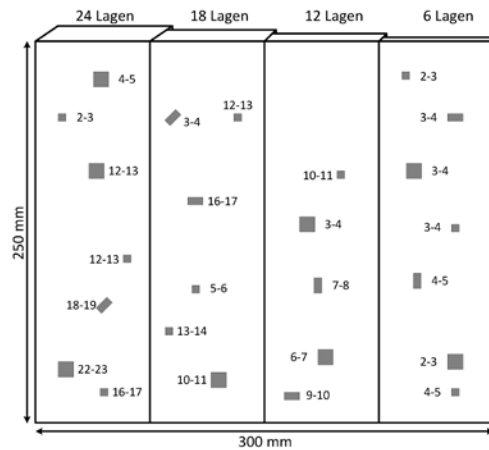


Abb. 1. Schematische Darstellung eines Probenkörpers (Fehlerplan). Die grauen Regionen stellen die künstlichen Fehlstellen dar; die nebenstehenden Zahlen geben an zwischen welchen Lagen diese platziert wurden und stellen somit ein Maß für die Tiefe dar. Die Zählung der Lagen beginnt an der Oberfläche, weshalb eine größere Zahl einer größeren Tiefe entspricht.

2.2 Messaufbau und Datenauswertung

Jede Probenplatte wurde sowohl im Reflexions- als auch im Transmissionsmodus untersucht. Die Oberflächentemperatur wurde mit einer Quantendetektorkamera mit einer optischen Auflösung von 320 x 256 Pixel im Spektralbereich von 3,0 μm bis 5,0 μm aufgezeichnet. Der Abstand zwischen Probenplatte und Kamera wurde so gewählt, dass ein Pixel einer Länge von 1 mm entspricht. Zur thermischen Anregung wurden zwei Blitzlampen mit je einer elektrischen Leistung von 3 kJ und einer Pulsdauer von etwa 2 ms verwendet. Die Messdauer betrug jeweils 150 sec, bei einer Abtastfrequenz von 50 Hz. Die Messparameter wurden deswegen so gewählt, um die Temperaturdaten sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich auswerten zu können.

Die Auswertung der Temperaturdaten aus dem Reflexionsmodus erfolgte mittels Thermographic Signal Reconstruction Methode (TSR) [3] und die der Transmissionsmessungen mittels der Lineal Diffusivity Fitting Methode (LDF) [4]. Die Messdaten der Transmissionsmessungen wurden zusätzlich mittels der Fast Fourier Transformation (FFT) [5] ausgewertet. Tabelle 1 zeigt die ausgewählten Auswertemethoden für Messdaten aus dem Reflexions- und Transmissionsmodus. Die Auswertung der Meßdaten im Reflexionsmodus mittels FFT wurde nicht durchgeführt.

Tabelle 1. Ausgewählte Auswertemethoden für Messdaten des Reflexions- und Transmissionsmodus

		Auswertemethode	
		Puls Thermografie Zeitbereich	Puls Phasen Thermografie Frequenzraum
Messaufbau	Reflexionsmodus	TSR	FFT (nicht durchgeführt)
	Transmissionsmodus	LDF	FFT

2.2.1 Thermographic Signal Reconstruction, TSR

Die TSR Methode ist eine häufig verwendete Methode zur Auswertung von Reflexionsmessungen im Zeitbereich. Dabei werden die logarithmierten Temperaturdaten $\ln(T)$ als Funktion des Logarithmus der Zeit $\ln(t)$ mit einem Polynom fünfter bis neunter Ordnung approximiert. Der Zeitpunkt, bei dem die zweite Ableitung $\frac{d^2 \ln(T)}{d \ln(t)^2}$ maximal ist, ergibt, multipliziert mit π , die Diffusionszeit t_d . Bei bekannter Probendicke L kann daraus die effektive Temperaturleitfähigkeit α [m^2/s] des Materials berechnet werden. Fehlstellen im Material, z.B: Delaminationen, verändern den Wärmestrom gegenüber dem ungestörten Material und führen daher zu unterschiedlichen effektiven Materialparametern [3].

2.2.2 Linear Diffusivity Fitting, LDF

Die LDF Methode ist eine Methode zur Auswertung von Transmissionsmessungen im Zeitbereich. Dabei werden Temperaturdaten T mit der Wurzel aus der Zeit $\sqrt{t}$ multipliziert. Dieser Ausdruck wird dann logarithmiert $\ln(T * \sqrt{t})$ und als Funktion der reziproken Zeit $1/t$ als Gerade approximiert. Aus der Steigung der linearen Regression kann bei bekannter Probendicke L die effektive Temperaturleitfähigkeit α [m^2/s] berechnet werden. [4].

2.2.3 Fast Fourier Transformation, FFT

Die FFT kann für Messungen sowohl im Reflexions- als auch im Transmissionsmodus eingesetzt werden. Durch die Transformation vom Zeitraum in den Frequenzraum können Amplituden und Phasenwerte berechnet werden. Im Falle einer Dirac-förmigen Anregung sind alle Spektralkomponenten enthalten, deren Amplituden dann unterschiedlich stark gedämpft werden. Die verwendete pulsförmige Anregung mit einer Pulsdauer von 2 ms kann hinreichend genau als Dirac-Anregung angesehen werden [5].

3. Signal to Background Contrast, SBC

Im Hinblick auf die POD Analyse wurde der Signal Hintergrund Kontrast als Fehlercharakterisierung eingeführt. Der SBC ist in Gleichung 1 gegeben

$$SBC = \frac{SW - MW}{STD} \quad (3)$$

Der SW stellt dabei einen Schwellenwert dar, der die, durch den Fehler verursachten Signale der einzelnen Pixel ersetzt (siehe Kapitel 3.1). MW ist der räumliche Mittelwert und STD die Standardabweichung des Hintergrundsignals. Je größer der SBC Wert ist, desto größer ist die Auffindwahrscheinlichkeit eines Fehlers.

3.1. Berechnung des SBC Wertes

Die Aktive Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem die, durch die Auswertung erhaltenen, Werte als Falschfarben oder Grauwerte dargestellt werden. Fehlstellen zeigen sich im Graustufenbild als hellere beziehungsweise dunklere Stellen gegenüber dem ungestörten Material.

Der Schwellenwert SW ist jener Grauwert, der von 75 Prozent der Pixelwerte des Fehlers überschritten wird. Das heißt, bei einer realen Fehlergröße von 10 x 10 mm und einem gewählten Abbildungsverhältnis von 1:1 liegen die Grauwerte von 75 Pixeln über dem Schwellenwert. Die Verwendung des Schwellenwertes zur Berechnung des SBC Wertes anstatt des räumlichen Mittelwertes über die Graustufen der Pixel des Fehlerbereichs resultiert aus der Forderung nach einer auf der sicheren Seite liegenden (das heißt konservativen) Abschätzung von Fehlern [6]. Da der berechnete Schwellenwert kleiner ist als der räumliche Mittelwert werden Unregelmäßigkeiten in der örtlichen Verteilung der Graustufen eher als Fehler qualifiziert als bei Verwendung des räumlichen Mittelwerts.

Die Berechnung des Schwellenwerts erfolgt EDV-gestützt mittels eines, für diesen Zweck an der Fachhochschule Wels entwickelten, Algorithmus. Die Vorgehensweise zur Berechnung des SBC ist in den Abbildungen 2a – 2c dargestellt. Die Balken über den jeweiligen Abbildungen repräsentieren nur die Grauwerte der Pixel entlang der eingezeichneten blauen Linie. Sämtliche Kriterien zur Berechnung des Schwellenwertes und

somit des SBC Wertes gelten jedoch für die Fläche. Im ersten Schritt wird die angezeigte Fehlstelle mittels einer Region Of Interest (ROI) markiert (eingerahmt). Abbildung 2a zeigt die Einrahmung der Fehlstelle vom Prüfer als strichlierte Linie und darüber die Grauwerte entlang der blauen Linie als Balkendiagramm dargestellt. Darauffolgend wird der Schwellenwert, beginnend beim kleinsten Grauwert innerhalb des ROI, in kleinen Schritten solange erhöht bis nur jene 75 Pixel (welche 75 % der realen Fehlergröße repräsentieren) diesen überschreiten. Abbildung 2b zeigt jene Pixel, deren Grauwert den Schwellenwert überschreiten. Pixel mit einem Grauwert unterhalb des Schwellenwertes werden maskiert und sind deshalb schwarz dargestellt. Darüber sind die Balken dieser verbleibenden Pixel rot dargestellt und der ermittelte Schwellenwert SW als grüne, strichlierte Linie eingezeichnet. Deutlich erkennbar ist, dass der berechnete Schwellenwert unter dem Mittelwert der verbleibenden Pixel liegt. Im letzten Schritt wird automatisch eine fehlerfreie Region erzeugt, die die Fehlstelle (ROI aus Schritt 1) umrahmt. Die Breite dieser fehlerfreien Region ist mit 40% der ROI Breite voreingestellt und wird vom Algorithmus automatisch berechnet. Die Grauwerte der Pixel innerhalb dieser fehlerfreien Region werden zur Berechnung des Mittelwerts MW und der Standardabweichung STD herangezogen. Abbildung 2c zeigt die Pixel dieser fehlerfreien Region innerhalb der beiden strichlierten roten Linien. Darüber sind die Balken der zur Berechnung der Werte MW und STD herangezogenen Pixel blau dargestellt. Durch diese Prozedur wird jede Fehlstelle durch einen SBC Wert charakterisiert, welcher später für die Erstellung der hit / miss Matrix verwendet wird.

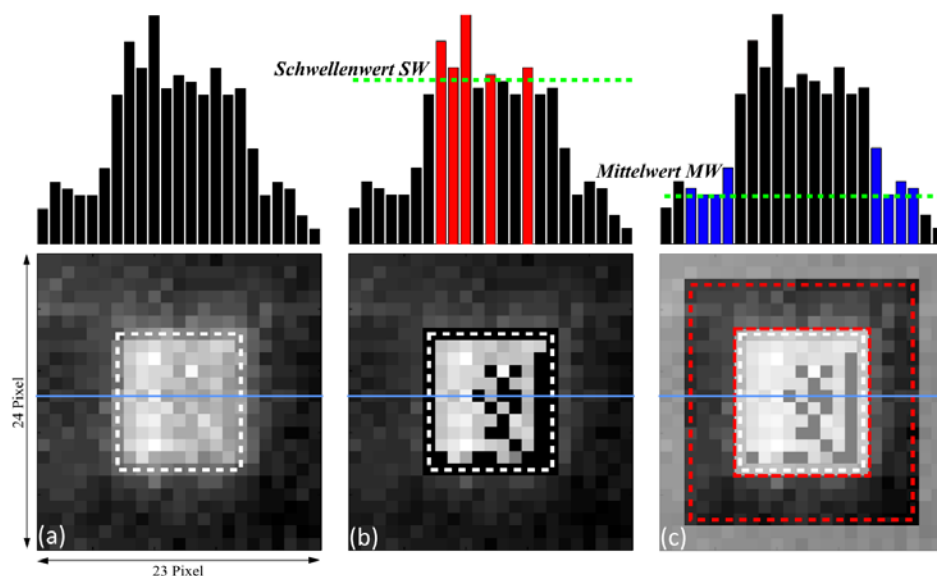


Abb. 2. Darstellung der Ermittlung des SBC Wertes anhand eines Fehlers der Größe 10 x 10 mm. Die Balken über den jeweiligen Abbildungen zeigen die Grauwerte entlang der eingezeichneten blauen Linie. Kriterien zur Bestimmung des SBC Wertes gelten nur für die Fläche: (a) Die angezeigte Fehlstelle wird mittels eines ROI eingrahmt. (b) Anhebung des Schwellenwertes, bis 75 Prozent der Pixelwerte des Fehlers diesen überschreiten. Die Grauwerte dieser Pixel sind als rote Balken dargestellt. Der berechnete Schwellenwert SW ist als grüne, strichlierte Linie eingezeichnet. (c) automatische Definition einer fehlerfreien Region nach vorgegebenen Kriterien und Berechnung der Werte MW und STD . Die Grauwerte der zur Berechnung herangezogenen Pixel sind als blaue Balken dargestellt.

3.2. Abhängigkeit des SBC Wertes von der Fehlertiefe

In diesem Kapitel wird gezeigt, inwieweit ein Rückschluss vom SBC Wert auf die Tiefenlage des Fehlers möglich ist.

In Abbildung 3 sind SBC Werte aus Reflexionsmessungen mit TSR Auswertung in Abhängigkeit der Fehlertiefe für eine Fehlergröße von 10 x 10 mm bei unterschiedlichen Gesamtlaminatdicken dargestellt. Da die Fehlertiefe in Einheiten von Lagen angegeben wird, resultieren daraus Kommawerte. So bedeutet eine Fehlertiefe von 2,5 Lagen, dass der Fehler zwischen der zweiten und dritten Lage liegt (siehe auch Abb. 1).

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, ist eine eindeutige Zuordnung des SBC Wertes zu einer Fehlertiefe nicht möglich. So schwankt der SBC Wert von Fehlern zwischen der zweiten und dritten Lage bei einer Gesamtlaminatdicke von 6 Lagen zwischen rund 5 und 10. Der Grund für diese Schwankungen liegt in der nicht reproduzierbaren Herstellung eines Fehlers, da dieser manuell durch Falten und Kleben sowie Einbringung in den Probenkörper erfolgt. Dadurch ist es nicht möglich stets die gleiche Menge an Luft im Polster einzuschließen, was erhebliche Auswirkungen auf die Stärke des Signals zur Folge hat. Aus diesem Grund wurde die POD Analyse anhand von hit / miss Daten ausgeführt und der SBC Wert als Fehlermerkmal gewählt.

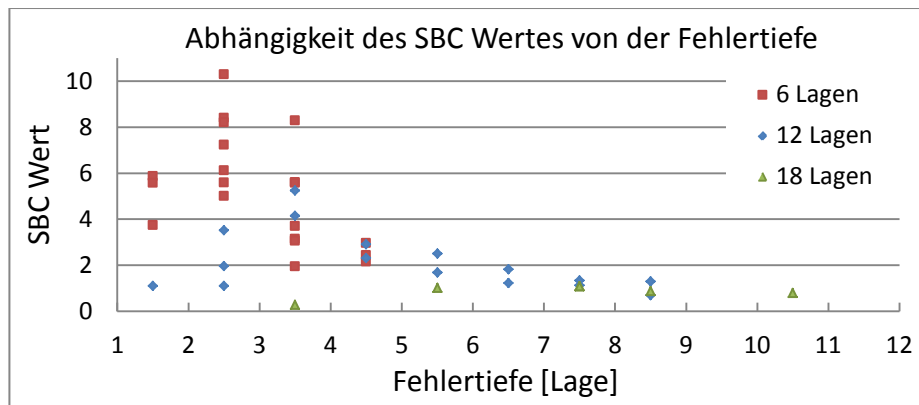


Abb. 3. Darstellung der Abhängigkeit des SBC Wertes (aus Reflexionsmessungen mit TSR Auswertung) von der Fehlertiefe anhand eines Fehlers der Größe 10 mm x 10 mm bei unterschiedlichen Gesamtlaminatdicken.

4. POD Analyse

4.1 Hit/Miss Daten

Für diese Studie wurden auf Basis der verschiedenen Auswertemethoden (Kapitel 2.2) vier unterschiedliche hit / miss Datensätze erzeugt. Vorab wurde für jede Fehlstelle der SBC Wert ermittelt, was aufgrund der bekannten Position (Fehlerplan) auch für kaum oder nicht sichtbare Fehlstellen möglich war. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Auswertemethoden wurden hierbei unabhängig voneinander behandelt. Für die Erstellung der Datensätze 1 und 2 wurden einem Prüfer Ergebnisbilder der TSR und LDF Auswertung und die zugehörigen Fehlerpläne zur Verfügung gestellt. Ziel dieser Auswertung war es, zu ermitteln ab welchem minimalen SBC Wert dieser Prüfer eine Fehleranzeige nicht mehr von einer fehlerfreien Region unterscheiden kann. Zur Erstellung der Datensätze 3 und 4 wurden fünf Diffusionszeitbilder von Reflexionsmessungen mit TSR als Auswertemethode und fünf Phasenkontrastbilder von Transmissionsmessungen mit FFT als Auswertemethode von neun verschiedenen Prüfern ausgewertet. Die Aufgabe der Prüfer bestand darin, gefundene Fehlstellen zu markieren. Die möglichen Fehlergrößen und Orientierungen waren den Prüfern bekannt, nicht jedoch die Anzahl und Position der einzelnen Fehlstellen.

Für die Auswertung der Ergebnisbilder wurde das in Kapitel 3.1 beschriebene Softwaretool verwendet. Damit konnten die Prüfer den Kontrast anpassen, die Farbtabelle (engl. colormap) ändern und gefundene Fehlstellen einzeichnen.

Die Ergebnisse dieser Auswertung wurden in hit / miss Matrizen zusammengefasst, wobei jeder Fehlstelle deren SBC Wert sowie die Trefferdaten der einzelnen Prüfer zugewiesen wurden. Abbildung 4 zeigt einen Auszug aus einer hit / miss Matrix. In der ersten Spalte ist der SBC Wert und in den weiteren Spalten sind die hit / miss Daten der neun Prüfer dargestellt.

SBC	Prüfer 1-9
1,168	0 1 1 1 1 1 1 1 0
1,179	1 1 0 0 0 0 0 0 0
1,198	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,206	0 1 0 0 0 0 0 0 0
1,211	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,251	1 1 1 1 1 0 1 1 1
1,276	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,288	0 0 0 0 0 0 0 0 1
1,293	0 0 0 0 0 0 0 0 0
1,306	0 1 1 0 1 0 1 1 0
1,307	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,320	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,337	0 1 0 0 0 0 1 1 1
1,341	0 0 0 1 0 0 0 0 0
1,351	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,384	0 1 1 1 1 1 0 1 1
1,388	0 1 1 1 1 1 1 1 1
1,400	0 1 0 1 0 0 0 0 0
1,425	1 1 0 1 1 1 1 1 1
1,432	1 1 1 1 1 0 1 1 1
1,522	1 1 1 1 1 1 1 1 1
1,537	0 1 0 1 1 0 0 1 0

Abb. 4. Auszug aus der hit / miss Matrix

Tabelle 2. Zusammengefasste Darstellung der einzelnen Prüfergebnisse

	Reflexionsmodus, TSR; Anzahl Fehlstellen N=73			Transmissionsmodus, FFT; Anzahl Fehlstellen N=72			Beide N=145
	Hits (n)	Misses (N-n)	Detektions Rate n/N [%]	Hits (n)	Misses (N-n)	Detektions Rate n/N [%]	Detektions Rate n/N [%]
Prüfer 1	55	18	75,3	58	14	80,6	77,9
Prüfer 2	50	23	68,5	53	19	73,6	71,0
Prüfer 3	50	23	68,5	52	20	72,2	70,3
Prüfer 4	50	23	68,5	52	20	72,2	70,3
Prüfer 5	47	26	64,4	53	19	73,6	69,0
Prüfer 6	47	26	64,4	51	21	70,8	67,6
Prüfer 7	45	28	61,6	52	20	72,2	66,9
Prüfer 8	45	28	61,6	51	21	70,8	66,2
Prüfer 9	44	29	60,3	44	28	61,1	60,7

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der einzelnen Prüfer (hits, misses und Detektionsrate) für die beiden Auswertemethoden TSR und FFT dargestellt. Die Detektionsrate ist das Verhältnis der Anzahl n detektierter Fehlstellen zur Gesamtanzahl N der Fehlstellen. Die relativ geringe Detektionsrate lässt sich durch sehr geringe Detektierbarkeit mancher Fehlstellen erklären.

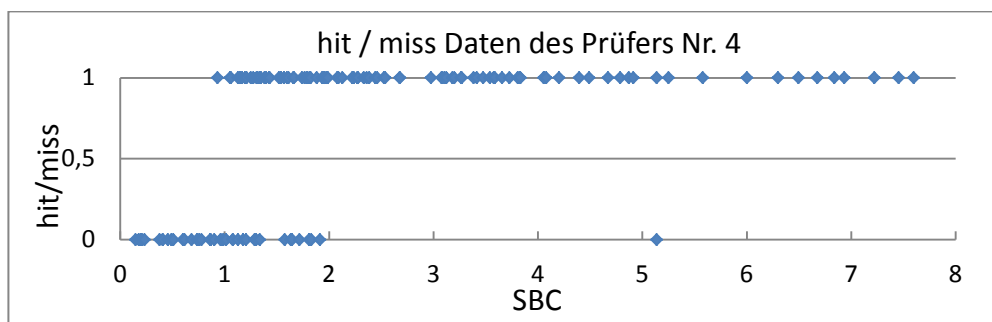


Abb. 5. Hit / miss Daten des Prüfers Nr. 4 mit einem überlappenden Bereich bei SBC Werten zwischen 1,0 und 2,0. Bei SBC = 5,2 wurde ein Fehler nicht entdeckt obwohl der SBC Wert sehr hoch ist. Dies ist als Ausreißer zu interpretieren.

In Abbildung 5 sind die hit / miss Daten des Prüfers Nr. 4 grafisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass dieser Prüfer Fehler mit einem SBC Wert kleiner 1 nicht und mit einem SBC größer 2 sicher erkannte. Bei SBC Werten zwischen 1 und 2 ist die Auffindwahrscheinlichkeit als eher zufällig zu bezeichnen. Ein Fehler mit dem sehr hohen SBC Wert von 5,2 wurde nicht entdeckt, was als Ausreißer zu interpretieren ist. Mögliche Gründe hierfür könnten sein, dass der Prüfer die Fehlstelle aufgrund schlechter Kontrastskalierung übersehen hat, Schwierigkeiten mit der Software hatte oder vergessen hat, die Fehlstelle zu markieren.

4.2 POD Modell und POD Funktion

Der erste Schritt einer POD Analyse auf Basis von hit / miss Daten ist es ein geeignetes Modell auszuwählen. Für diese Studie wurde die mh1823 Software [7] verwendet, die vier verschiedene link- Funktionen (logit, probit, Weibull und Log Normal) mit einer linearen oder logarithmischen Skalierung des Fehlermerkmals (hier der SBC Wert) zur Verfügung stellt. Die link- Funktionen sind nötig, um die binären Daten einer hit / miss Matrix mit dem Fehlermerkmal zu verknüpfen [1, 2].

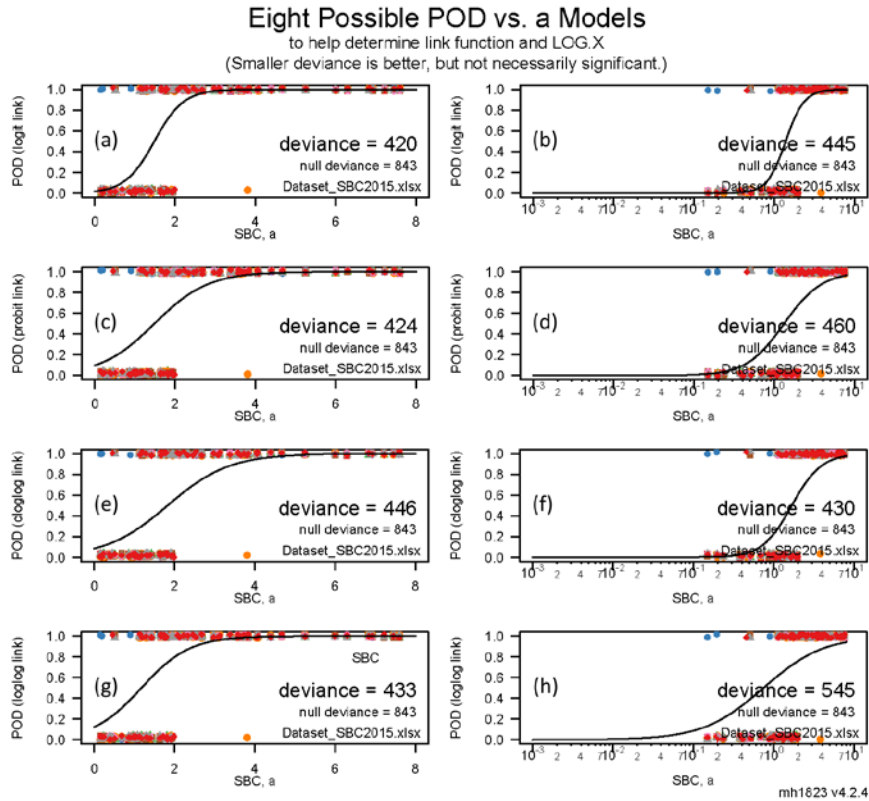


Abb. 6. Vergleich der acht möglichen link- Funktionen mit linearer (a, c, e, g) und logarithmischer Skalierung des Fehlermerkmals (b, d, f, h): (a, b) logit Funktion, (c, d) probit Funktion, (e, f) Weibull Funktion und (g, h) log normal Funktion

In Abbildung 6 sind die POD Analysen für den Datensatz der Reflexionsmessungen mit TSR Auswertung dargestellt. Für die POD Analysen wurden die hit / miss Matrizen aller neun Prüfer berücksichtigt. Wie daraus ersichtlich stellt die logit Funktion mit linearer x-Achse den besten Fit dar. Für die übrigen Datensätze wurde ebenfalls die logit Funktion als die geeignetste link- Funktion abgeleitet. Die logit Funktion ist gegeben als

$$POD(a) = \frac{e^{(\alpha+\beta a)}}{1+e^{(\alpha+\beta a)}} \quad (2)$$

wobei $a = SBC$ der Wert für das Fehlermerkmal ist und α und β Modellparameter sind.

Eine äquivalente Form der Gleichung 2 ist gegeben als

$$POD(a) = \frac{1}{1+e^{-\left(\frac{\pi}{3} \frac{a-\mu}{\sigma}\right)}} \quad (3)$$

wobei $\mu = -\frac{\alpha}{\beta}$ jener SBC Wert ist, der in 50 Prozent der Fälle gefunden wird und $\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{3}\beta}$ als Maß für die Sicherheit der POD-Kurve gilt. Je geringer der Wert von σ ist, desto steiler ist die POD-Kurve.

4.3 Vergleich von POD Kurven

Abbildung 7 zeigt POD Kurven (link-Funktion logit) für unterschiedliche Prüfer und unterschiedliche Datensätze.

In den Abbildungen 7a und 7b sind die Ergebnisse des Einzelprüfers bei Messungen im Reflexionsmodus mit TSR Auswertung beziehungsweise im Transmissionsmodus mit LDF Auswertung dargestellt. Bei der Auswertung waren dem Einzelprüfer die Fehlerpositionen und die Anzahl der Fehler (Fehlerplan) bekannt. Die a_{90} Werte liegen bei $SBC = 1,875$ (TSR) beziehungsweise $SBC = 1,347$ (LDF).

In den Abbildungen 7c und 7d sind die Ergebnisse der neun Prüfer bei Messungen im Reflexionsmodus mit TSR Auswertung beziehungsweise im Transmissionsmodus mit der Auswertemethode FFT dargestellt. Bei den Auswertungen waren den Prüfern die Fehlerpositionen und die Anzahl der Fehler nicht bekannt. Die a_{90} Werte liegen bei SBC = 2,289 (TSR) beziehungsweise SBC = 1,952 (FFT).

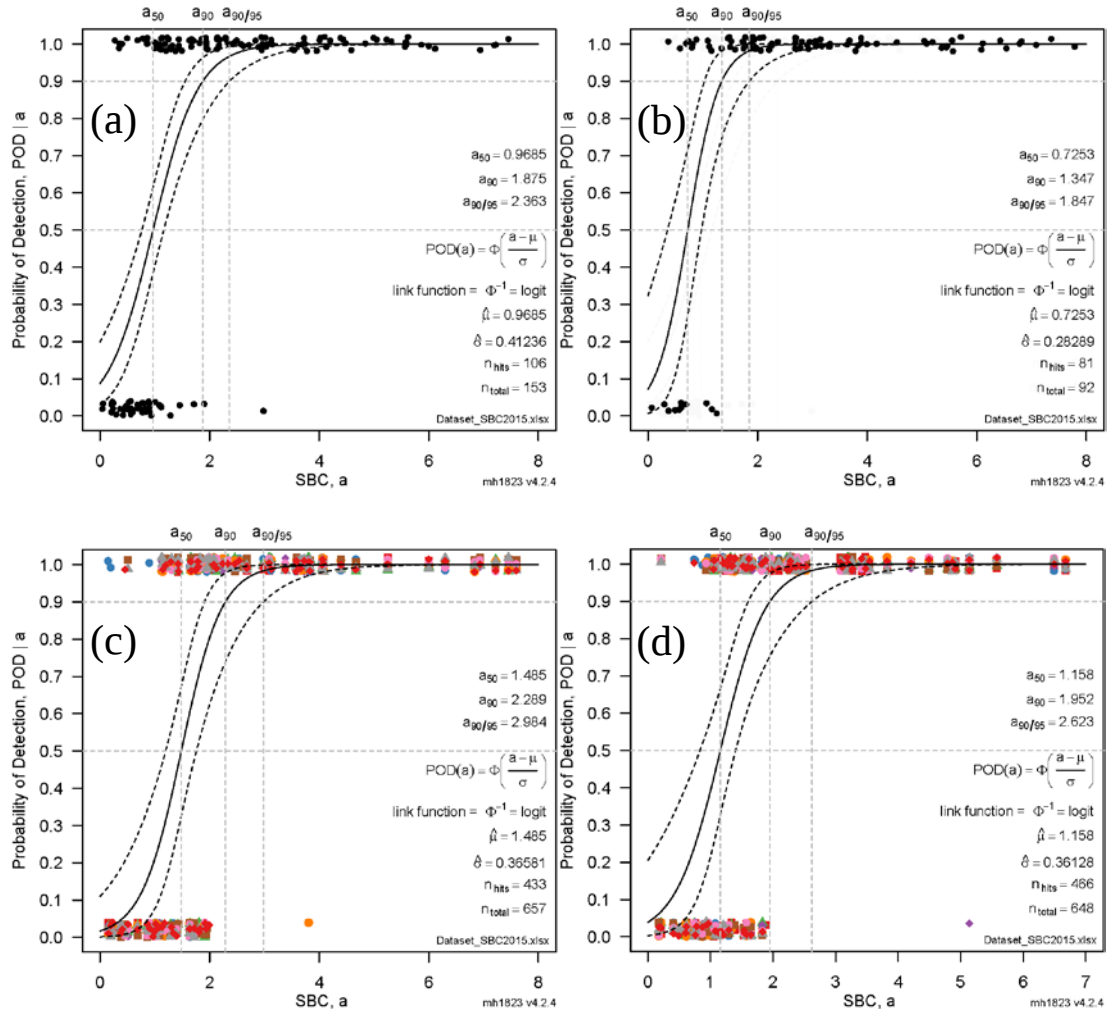


Abb. 7. POD Kurven aus hit / miss Daten von (a) einem Prüfer bei Messungen im Reflexionsmodus mit TSR als Auswertemethode und bekannter Fehlerposition, (b) einem Prüfer bei Messungen im Transmissionsmodus mit LDF als Auswertemethode und bekannter Fehlerposition, (c) neun Prüfern bei Messungen im Reflexionsmodus mit TSR als Auswertemethode ohne Zusatzinformation und (d) neun Prüfern bei Messungen im Transmissionsmodus mit FFT als Auswertemethode ohne Zusatzinformation

Tabelle 3 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der POD Analyse der unterschiedlichen Prüfer und Datensätze.

Tabelle 3. Zusammengefasste Darstellung der Ergebnisse der POD Analyse der unterschiedlichen Prüfer und Datensätze

	Durchschnittliche Detektionsrate	a_{90}	$a_{90/95}$
Reflexionsmessung TSR Auswertung Einzelprüfer mit Zusatzinformation	100% ¹	1,875	2,363
Transmissionsmessung LDF Auswertung Einzelprüfer mit Zusatzinformation	100% ¹	1,347	1,847
Reflexionsmessung TSR Auswertung 9 Prüfer	65,9%	2,289	2,984
Transmissionsmessung FFT Auswertung 9 Prüfer	71,9%	1,952	2,623

¹ dieser Wert ist wegen des bekannten Fehlerplanes nicht relevant

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Der Vergleich der a_{90} Werte alleine zeigt, dass ohne Berücksichtigung eines Vertrauensbereiches, die SBC_{90} Werte bei Messungen im Transmissionsmodus generell kleiner sind als im Reflexionsmodus. Dies kann als Indiz gewertet werden, dass der Transmissionsmodus in Bezug auf die Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlern empfindlicher ist, als der Reflexionsmodus. Dies wird auch durch die höhere durchschnittliche Detektionsrate bei den Transmissionsmessungen bekräftigt.

Für eine POD Analyse mit der Fehlertiefe als Fehlermerkmal ($\hat{a}$ vs. a Auswertung) ist die Herstellung eines Fehlers zwecks dessen Reproduzierbarkeit zu optimieren.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde finanziell durch das TAKE OFF Programm des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) unterstützt. Dank gilt auch unserem Kooperationspartner FACC AG.

Referenzen

- [1] A.P. Berens, 'NDE Reliability Data Analysis', ASM Metals Handbook, Vol. 17, 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988, pp. 689-701
- [2] Department of Defense, 'MIL-HDBK-1823: Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment', US Department of Defense, 1999
- [3] S.M. Shepard, T. Ahmed, B.A. Rubadeux, D.Wang, J.R. Lhota, 'Synthetic processing of pulsed thermographic data for inspection of turbine components' Insight, Vol. 43, No 9, Sept. 2001, British Inst. of NDE, pp. 587-589
- [4] G. Hendorfer, G. Mayr, G. Zauner, M. Haslhofer, R. Pree, 'Quantitative Determination of Porosity by Active Thermography', American Institute of Physics Conference Proceedings, Vol. 894, Portland/Oregon, USA, 2006, pp. 702-708
- [5] X. Maldague and S. Marinetti, 'Pulse phase infrared thermography', J. Appl. Phys. 79 (5) (1996), pp. 2694-2698
- [6] mündliche Mitteilung DI Jakov SEKELJA, FACC AG
- [7] Charles Annis, P.E. (2014), "Statistical best-practices for building Probability of Detection (POD) models" R package mh1823, version4.2.4, <http://StatisticalEngineering.com/mh1823/>