

Optisch angeregte, thermografische Prüfung von semi-transparenten thermoplastischen Verbundwerkstoffen

Jürgen GRUBER¹, Günther MAYR¹, Gerhard BÄCK²

¹ FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich

² Engel Austria GmbH, Sankt Valentin, Österreich

Kontakt E-Mail: juergen.gruber@fh-wels.at

Kurzfassung

Im Gegensatz zu faserverstärkten Kunststoffen mit duroplastischer Matrix sind thermoplastische Faserverbunde, wie sie z.B. in der Spritzgussindustrie eingesetzt werden, meist nicht opak, sondern haben vom verwendeten Matrix/Fasersystem abhängige spektrale Eigenschaften. Optisch angeregte Puls-Thermografie Messungen wurden an Probenplatten mit unterschiedlichen, künstlich eingebrachten Fehlstellen durchgeführt. Die Platten wurden aus verschiedenen Materialsystemen, wie Polypropylen (PP) oder Polyamid (PA6, PA6.6) verstärkt mit Glas- bzw. Carbonfasern gefertigt. Zudem erfolgten Messungen an realen 3D-Komponenten mit komplexer Geometrie, die aus sogenannten Tapes gefertigt wurden.

Zur Detektion der Fehlstellen bei unterschiedlichen Materialsystemen kamen Standardmethoden wie die Thermographic-Signal-Reconstruction (TSR) Methode, die Linear-Diffusivity-Fitting (LDF) Methode, Puls-Phasen-Thermografie (PPT) und Methoden basierend auf der Early-Time-Detection zum Einsatz. Die einzelnen Ergebnisse wurden in fünf Detektierbarkeitsklassen eingeordnet und in einer Detektionsmatrix zusammengefasst. Dies gibt einen detaillierten Überblick, welche thermografische Methoden für eine bestimmte Art von Fehlstelle und Materialsystem geeignet sind.

Die thermografische Untersuchung der 3D Komponenten wurden mit Röntgen-Computer-Tomografie Messungen verglichen, um tatsächliche Fehlstellen von Auffälligkeiten aufgrund der komplexen Geometrie unterscheiden zu können.

Hohe Taktraten der Spritzgussindustrie beschränken das Zeitfenster für eine Qualitätssicherung deutlich. Hinzu kommt, dass an realen 3D-Komponenten Standardauswertemethoden zur Bestimmung der Diffusionszeit (TSR- und LDF-Methode) einen weiten Bereich an Ergebniswerten liefern, da aufgrund des Lagenaufbaus oder einer funktionalen Hinterspritzung das Bauteil unterschiedliche Dicken aufweist.

Die hohe Anzahl an baugleichen Komponenten erlaubt die Anwendung bestimmter Bildverarbeitungsmethoden. Durch den Vergleich eines aktuellen Ergebnisbildes mit einem berechneten, fehlerfreien Bild konnte eine schnelle Fehlerdetektion entwickelt werden.

1. EINFÜHRUNG

In der Spritzgussindustrie kommen vermehrt thermoplastische Faserverbunde zum Einsatz, welche anders als Duroplaste, meist nicht opak sind, sondern von der verwendeten Faser/Matrix Kombination abhängige spektrale Eigenschaften aufweisen. Aufgrund der hohen Taktraten der Spritzgussindustrie liegt der Fokus dieser Arbeit auf einer schnellen und robusten Fehlerdetektion, anstatt einer quantitativen Bewertung.

2. TESTPLATTEN MIT KÜNSTLICHEN FEHLSTELLEN

Es wurde die Eignung von Standardauswertemethoden zur Detektion unterschiedlicher Fehlerarten bei unterschiedlichen Materialsystemen bewertet. Hierzu wurden Testplatten aus verschiedenen Matrix/Faser Kombinationen (PA6, PA6.6, PP mit Glas- bzw. Carbonfasern) mit künstlich eingebrachten Fehlstellen thermografisch geprüft. So werden typische Fehlerarten wie Fremdmatereialeinschlüsse, Delaminationen, Porenester oder Dickenvariationen simuliert. Abbildung 1 zeigt eine Testplatte mit überlagertem Fehlerplan.

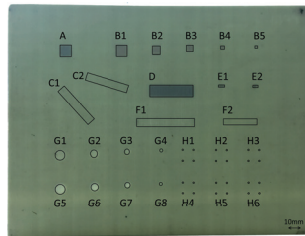


Abb. 1: Mit Fehlerplan überlagerte Fotografie einer Testplatte aus Polypropylen (PP), natur mit Glasfasern.

Die Testplatten wurden mit optisch angeregter Blitzthermografie im Reflexions- und Transmissionsmodus geprüft. Jede Fehlstelle ist im Temperaturbereich, sowie mit Standardauswertemethoden wie der Linear-Diffusivitäts-Fitting (LDF) Methode [1], der Thermographic-Signal-Reconstruction (TSR) Methode [2] und der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) [3] ausgewertet worden. Die Detektierbarkeit der einzelnen Fehlstellen wurde in fünf Klassen eingeteilt und in die Detektionsmatrizen eingetragen.

Prüfkonzzept: PPT Transmission			A	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	D	E1	E2	F1	F2	G1-G4	G5- G8	H1	H2	H3	H4	H5	H6	
2mm	PA6, schwarz eingefärbt	GF, Gewebe	3	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	2	3
	PA6, schwarz eingefärbt	GF, unidirektional	3	1	1	1	1	2	2	0	0	2	4	0	0	0	1	1	1	2	5	3	1	4
	PA6, schwarz eingefärbt	CF, Gewebe	2	1	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	2
	PA6, schwarz eingefärbt	CF, unidirektional	3	1	1	1	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	3
	PA6.6, schwarz eingefärbt	GF, Gewebe	4	1	1	1	2	3	4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	2
	PA6.6, natur	GF, Gewebe	1	3	3	4	5	4	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1	2	4	5	4	1	4
4mm	PP, schwarz eingefärbt	GF, unidirektional	4	1	1	2	3	4	2	3	3	5	3	2	1	1	1	2	5	3	1	4	5	4
	PP, natur	GF, unidirektional	1	1	2	2	3	3	4	4	1	1	1	2	1	1	1	2	5	3	1	2	3	4
	PA6, schwarz eingefärbt	GF, Gewebe	3	2	2	3	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	3
	PA6, schwarz eingefärbt	CF, Gewebe	4	2	3	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	5	3	2	4	5
	PA6.6, schwarz eingefärbt	GF, Gewebe	2	2	2	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	4
	PA6.6, schwarz eingefärbt	GF, Gewebe	2	2	2	3	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	3	1	4
			0	Fehlstelle nicht vorhanden													1	Fehlstelle offensichtlich						
			2	Fehlstelle sehr gut detektierbar													3	Fehlstelle gut detektierbar						
			4	Fehlstelle nur mithilfe des Fehlerplans detektierbar													5	Fehlstelle nicht detektierbar						

0 Fehlstelle nicht vorhanden
1 Fehlstelle offensichtlich
2 Fehlstelle sehr gut detektierbar
3 Fehlstelle gut detektierbar
4 Fehlstelle nur mithilfe des Fehlerplans detektierbar
5 Fehlstelle nicht detektierbar

Abb. 2: Beispiel einer Detektionsmatrix für das Prüfkonzzept Puls-Phasen Thermografie im Transmissionsmodus.

Eine Detektionsmatrix ermöglicht die schnelle Auswahl eines Prüfkonzpts zur Detektion bestimmter Fehlerarten bei einer bestimmten Faser/Matrix Kombination. Abbildung 2 zeigt die Detektionsmatrix zum Prüfkonzzept PPT Transmission. Sie gibt an, welche Fehlerarten in den jeweiligen Materialsystemen detektiert werden können. So ist beispielsweise ersichtlich, dass Fehlerart H2 (1mm tiefe Bohrungen) nur bei eingefärbter Matrix nachweisbar ist und das besser bei unidirektionaler Glasfaser als generell bei Gewebe. E1 und E2 (Fremdkörpereinschlüsse) sind ausschließlich in ungefärbten Testplatten detektierbar.

3. EFFEKT DER SEMITRANSPARENZ

Glasfaserverstärkte Thermoplaste sind oft zumindest teiltransparent. Die Anregungsenergie der Xenonblitzlampen dringt dadurch auch ins Material ein was eine Volumheizung erzeugt. Besonders die LDF Methode zeigt einen transparenzabhängigen, systematischen Fehler. Der Temperaturanstieg einer Transmissionsmessung wird quasi linear dargestellt und die Diffusionszeit $t_d = -4 \cdot k = \frac{t_d^2}{\kappa}$ anhand der Steigung k bestimmt. Die Volumheizung krümmt diese Gerade, was zu einem verfälschten Ergebniswert führt.

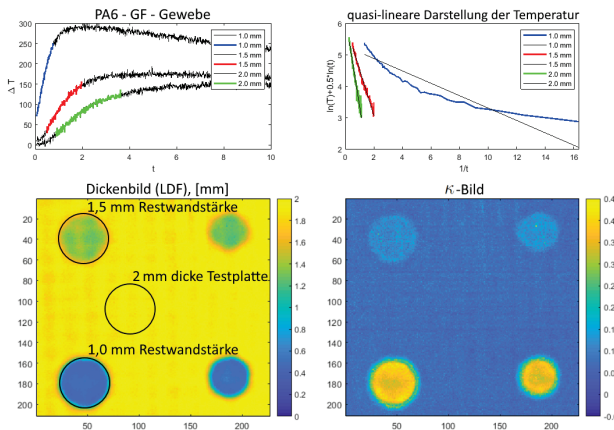


Abb. 3: Effekt der Semitransparenz an einer glasfaserverstärkten Testplatte aus PA6 mit Sacklochbohrungen

Abbildung 3 stellt den Transparenzeinfluss an einer 2 mm dicken Testplatte aus glasfaserverstärktem PA6 dar. Sie enthält Sacklochbohrungen mit 1,0 mm bzw. 1,5 mm Restwandstärke. Bei 1 mm ist die relative Transparenz am stärksten und damit auch die Krümmung (blau). Im Dickenbild ist der Transparenzeinfluss anhand falsch berechneter Dickenwerte erkennbar. Während bei 1,5 mm die Abweichung zur tatsächlichen Dicke vergleichsweise gering ist, beträgt sie bei 1 mm ~ 30-40 %. Die Krümmung $\kappa = \frac{f''}{(1+f'^2)^{3/2}}$ lässt sich als Vertrauensmaß für das Ergebnis der LDF Methode heranziehen. Das κ -Bild zeigt im Bereich der Bohrung mit 1mm Restwandstärke die größte Krümmung bzw. das schlechteste Vertrauensmaß. So kann die Fehlerindikation einer Dickenchwankung von einer Variation der Transparenz, etwa aufgrund einer Faserverschiebung, unterschieden werden.

4. 3D KOMPONENTEN MIT KOMPLEXER GEOMETRIE

Konstruktionsbedingt beinhalten reale 3D Komponenten häufig enge Radien, Kanten, Flächen mit unterschiedlichen Winkeln und Orientierung sowie variierende Dicken aufgrund der Lagenanzahl. Oft werden solche Bauteile noch mit einer Hinterspritzung funktionalisiert. All diese Eigenschaften beeinflussen den Wärmefluss und führen mitunter zu Signalen, die als Fehlstelle fehlinterpretiert werden können.

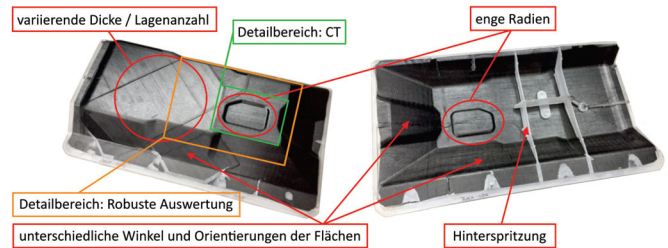


Abb. 4: 3D Komponente in Front- und Rück-Ansicht mit eingezeichneten Konstruktionsmerkmalen und Detailbereichen.

Abbildung 4 zeigt ein Testbauteil in Front- und Rückansicht. Neben den Konstruktionsmerkmalen sind die Detailbereiche der Auswertung mittels 3D-Röntgen-Computertomographie (3D-XCT), sowie jener der Auswertung mittels künstlichem Soll-Ergebnisbild eingezeichnet.

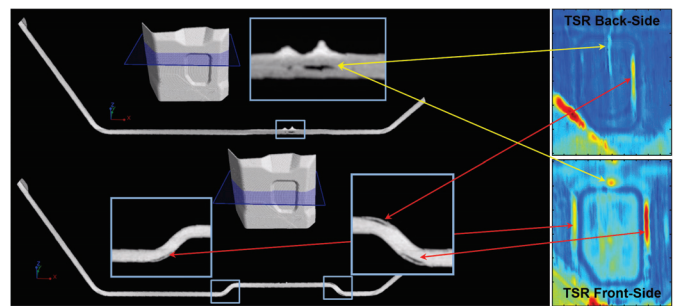


Abb. 5: Vergleich der Ergebnisse von thermografischen Untersuchungen des Detailbereichs im Reflexionsmodus (Diffusionszeitbilder, TSR) und Ergebnisse einer 3D-XCT Messung.

Abbildung 5 zeigt Ergebnisse thermografischer Untersuchungen des Detailbereichs im Reflexionsmodus (Diffusionszeitbilder, TSR) und Ergebnisse einer 3D-XCT Messung. Delaminationen im Bereich der engen Radien sind in beiden Ergebnisbildern sichtbar. Sie befinden sich im äußeren Radius (rote Pfeile) und sind oberflächennah, weshalb das Bauteil von beiden Seiten geprüft werden muss. Eine weitere Delamination unter einem Grat aus Matrixmaterial (gelbe Pfeile) zeigt sich entweder als typischer Bereich höherer Diffusionszeit t_d (TSR Front-Side) oder ist unter dem Grat nicht detektierbar (TSR Back-Side).

5. ROBUSTE AUSWERTUNG MIT KÜNSTLICHEM SOLL-ERGEBNISBILD

Hohe Taktraten der Spritzgussindustrie erfordern eine schnelle und robuste Fehlerdetektion. Eine genaue Bewertung detektierter Fehlstellen ist aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen oft unnötig. Die bloße Detektion einer Fehlstelle ist ausreichend um eine Komponente als Ausschuss zu deklarieren. Die hohe Anzahl baugleicher Komponenten erlaubt die Anwendung einer Methode, die in der Fotografie als Stapelbearbeitung bekannt ist [4]. Zufällige Fehlstellen werden mittels Medianfilterung eines Bildstapels entfernt. Analog lässt sich aus mehreren Ergebnisbildern ein fehlerfreies Soll-Ergebnisbild berechnen, das zum Vergleich mit aktuellen Ergebnissen verwendet wird. Durch Differenzbildung heben sich geometriebedingte Signale auf, was den Fehlerkontrast verbessert.

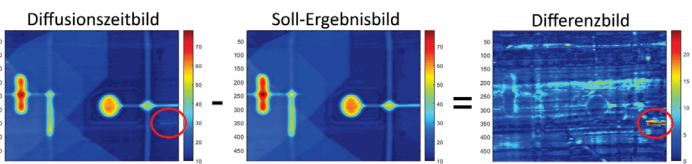


Abb. 6: Differenzbild (rechts) berechnet aus dem aktuellen Ergebnisbild (links) und dem fehlerfreien Soll-Ergebnisbild (mitte)

Abbildung 6 zeigt ein Diffusionszeitbild (LDF) der 3D Komponente (links), das berechnete Soll-Ergebnisbild (mitte) und die relative Differenz der beiden als Bild (rechts). Der geometriebedingte weite Umfang der Ergebniswerte reduziert sich deutlich. Eine Fehlstelle (rote Markierung), die im Diffusionszeitbild aufgrund der weiten Kontraststreuung schwer sichtbar ist, tritt dadurch deutlich hervor. Über eine nachfolgende Bildverarbeitung ist diese Fehlstelle leicht automatisiert detektierbar.

6. DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft.

7. LITERATUR

- [1] Hendorfer G., Mayr G., Zauner G., Haslhofer M., Pree R., „Quantitative determination of porosity by active thermography“, Review of Progress in Quant. Nondestructive Evaluation, 26A, AIP Conf. Proc. 894, 702-708, 2007.
- [2] Shepard S.M., Ahmed T., Rubadeux B.A., Wang D., Lhota J.R., „Synthetic processing of pulsed thermographic data for inspection of turbine components“, Insight, Vol. 43, No 9, Sept. 2001, pp. 587-589
- [3] Maldaque X., Marinetti S., „Pulse phase infrared thermography“, J. Appl. Phys. 79 (1996) 2694-2698
- [4] <https://helpx.adobe.com/at/photoshop/using/image-stacks.html>