

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE ANALYSE DER OBERFLÄCHENWELLGKEIT VON ENDLOSFASERVERSTÄRKTEN DUROPLASTISCHEN FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN

Niklas Lorenz

Institut für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen
niklas.lorenz@rwth-aachen.de

21. Dezember 2023

I. Einleitung

Der Faserdruckeffekt (engl.: „Fibre print through“, FPT) stellt eine wesentliche Oberflächencharakteristik von endlosfaserverstärkten Kunststoffen (FVK) dar und entsteht durch die heterogene Verteilung von Faser- und Matrixbestandteilen an der Laminatoberfläche. Ortsaufgelöste harzreiche und -arme Bereiche, welche unterschiedliches Schwindungsverhalten aufweisen, führen zu einer inhomogenen Volumenänderung während des Verarbeitungsprozesses und bewirken, dass die Faserarchitektur für das menschliche Auge sichtbar wird (vgl. Abb. 1).

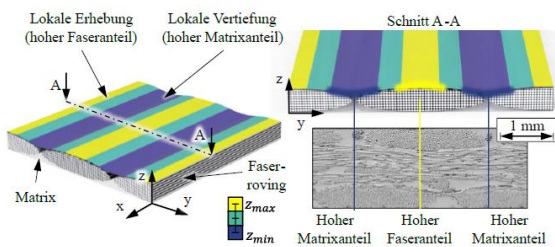


Abbildung 1: Oberflächenwelligkeit endlosfaserverstärkter FVK und Ausbildung des FPT.

Dieser Umstand resultiert darin, dass die hohen Standards der Automobilindustrie bezüglich der Produktqualität, d.h. exzellente Oberflächeneigenschaften („Class-A“), nicht unmittelbar mit FVK erfüllt werden können und kosten- sowie arbeitsintensive Nachbearbeitungen der Oberflächen notwendig ist.

Ziel ist es daher, die thermochemischen und thermo-mechanischen Mechanismen während des Aushärte- und Abkühlprozesses mittels experimenteller und numerischer Methoden präzise zu beschreiben, um darauf basierend Erkenntnisse über die exakten Ausbildungsmechanismen der prozessinduzierten Welligkeit zu erlangen und somit die resultierende Welligkeit und den notwendigen Nachbearbeitungsaufwand zu reduzieren.

II. Materialien und Methodik

Die avisierte Vorgehensweise und Methode sind in Abb. 2 dargestellt. Neben geometrischen Randbedingungen wird die Ausbildung der Welligkeit maßgeblich durch das komplexe Materialverhalten des Matrixwerkstoffs während des Verarbeitungsprozesses bestimmt.

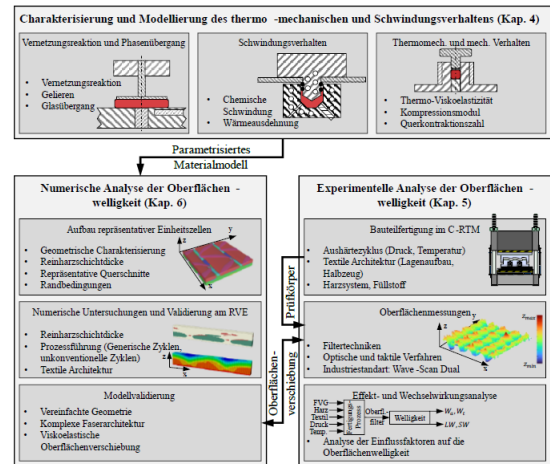


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

Dafür werden zunächst die Verarbeitungseigenschaften schnellvernetzender Epoxidharzsysteme (EP) charakterisiert und modelliert (Abb. 3). Dies beinhaltet auch die Entwicklung einer Messmethode zur Charakterisierung der chemischen Schwindung. Um generalisierbare Charakterisierungs- und Modellierungsroutinen abzuleiten, werden alle Untersuchungen konsequent an zwei EP durchgeführt.

Materialeigenschaft	Abhängigkeiten			
	T	t	ξ	p
Kap. 2 Reaktionsrate $\frac{d\xi}{dt}$	ja	nein	ja	nein
Kap. 2 Glasübergangstemperatur T_g	ja	ja	ja	nein
Kap. 3 + 4 Gelpunkt ξ_{GP}	ja (Aushärtezeit)	ja (Aushärtezeit)	ja	nein
Kap. 3 + 4 Chemische Schwindung β	nein	nein	ja	ja
Kap. 4, 5 Wärmeausdehnungskoeffizient α	ja	nein	nein	nein
Kap. 4, 5 Querkontraktionszahl ν	ja	ja	ja	nein
Kap. 4, 5 Kompressionsmodul B	ja	nein	ja	nein

Abbildung 3: Übersicht untersuchter (normal) und modellierter Materialeigenschaften (fett).

Gleichzeitig wird die experimentelle Analyse von im C-RTM gefertigten GFK-Laminaten präsentiert, welche sowohl den Bauteilherstellungsprozess als auch eine detaillierte Beschreibung der Mess- und Auswertemethodik umfassen. Um in der Literatur dokumentierte experimentelle Untersuchungen zur Oberflächenwelligkeit zu komplementieren, liegt der Fokus nicht auf LCM-Niederdruckanwendungen, sondern auf dem für die Serienfertigung relevanten C-RTM.

Parallel dazu wird der Aufbau eines numerischen Äquivalentes des Bauteilherstellungsprozesses anhand einer repräsentativen Einheitszelle beschrieben

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE ANALYSE DER OBERFLÄCHENWELLGKEIT VON ENDLOSFASERVERSTÄRKTEN DUROPLASTISCHEN FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN

und mittels Experimentaldaten validiert. Bestehende Simulationsmodelle zur Beschreibung der Oberflächenwelligkeit verwenden vereinfachte linear-elastische oder geometrische Simulationsansätze, sodass im Speziellen die Eignung eines für die Verarbeitung von EP empfohlenen vernetzungsgradabhängigen viskoelastischen Ansatzes angewendet und diskutiert wird. Die viskoelastischen Materialeigenschaften werden auch nach dem Fertigungs- und Abkühlprozess durch Kriechen des Matrixmaterials und einer damit verbundenen Änderung der Oberflächenverschiebung sowohl numerisch als auch experimentell durch zeitabhängige Vermessung der Oberflächenwelligkeit erfasst.

III. Ergebnisse

Als Bewertungsgrundlage für die Oberflächenwelligkeit werden neben dem industriell relevanten LW-Werten das arithmetische Mittel W_a und die Gesamthöhe der Welligkeit W_t verwendet.

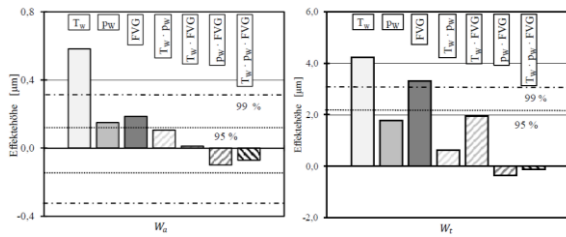


Abbildung 4: Effekthöhen der W_a (links) und W_t (rechts). Die gestrichelten Linien begrenzen die 95 % und 99 % Vertrauensbereiche.

Basierend auf experimentellen Untersuchungen können die Werkzeugtemperatur T_w und somit der angewendete Aushärtezyklus sowie die geometrischen Randbedingungen in Form des Faservolumengehaltes (FVG) als signifikanter Einflussfaktoren auf die resultierende Oberflächenwelligkeit (vgl. Abb. 4) identifiziert werden. Somit kommt dem verwendete Aushärtezyklus nicht nur bei der Laminatherstellung im konventionellen RTM eine entscheidende Bedeutung, sondern ist ebenfalls für die Ausprägung der Oberflächenwelligkeit für Hochdruckanwendungen wie dem C-RTM relevant.

Zusätzlich wird eine gute Übereinstimmung zwischen Experimenten und numerischen Simulationen festgestellt (vgl. Abb. 5). Die Wahl des Aushärtezyklus und des resultierenden T_g beeinflusst die Ausprägung der Oberflächenwelligkeit maßgeblich. Die Bedeutung der durch Dehnungsrelaxation induzierten zusätzlichen Verschiebung der Oberflächenwelligkeit wird durch Langzeitmessungen und entsprechende zeitabhängige Simulationen hervorgehoben und explizit bei den Validierungsversuchen berücksichtigt.

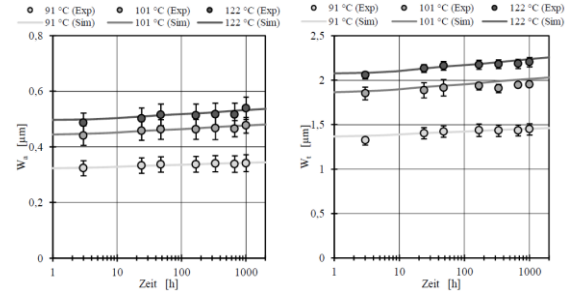


Abbildung 5: Numerische und experimentell ermittelte W_a (links) und W_t (rechts) für analysierte GFK-Laminat für unterschiedliche T_g .

Dem Kriechen des EP kommt eine entscheidende Rolle bei der Auswahl nachfolgender Oberflächenveredelungsprozesses zu, da auch nach der initialen Härtung mit einer Änderung der Oberflächenwelligkeit zu rechnen ist. Der vorgeschlagene Simulationsansatz stellt somit eine Grundlage für die Ermittlung von Optimierungsstrategien zur Verbesserung der Oberflächenqualität und zur Reduzierung des Nachbearbeitungsaufwandes dar.

IV. Zusammenfassung

Basierend auf der präzisen Beschreibung thermochemischer und thermomechanischer Mechanismen während des Aushärte- und Abkühlprozesses werden durch Kombination experimenteller und numerischer Methoden Erkenntnisse über die exakten Ausbildungsmechanismen der prozessinduzierten Welligkeit abgeleitet und akkurat beschrieben. Darauf aufbauend werden konkrete Maßnahmen zur Optimierung der Oberflächenqualität von FVK abgeleitet.

Weiterhin wird im Ergebnis gezeigt, dass aushärteabhängige thermo-viskoelastische Modelle eine zuverlässige Beschreibung des Materialverhaltens von EP und der daraus resultierenden prozessbedingten Welligkeit anhand einer repräsentativen Einheitszelle ermöglichen. Dabei wird das vorgeschlagene Simulationsmodell durch experimentelle Untersuchungen der Oberflächenwelligkeit mittels optischer und taktiler Messmethoden validiert.

Die maximalen Abweichungen zwischen Simulations- und Experimentaldaten liegen bei 5 % für die resultierende Oberflächenkennwerte. Eine wesentliche Neuerung besteht darin, dass die zeitliche Veränderung der Welligkeit während und nach der Verarbeitung, welche auf das viskoelastische Verhalten des Matrixmaterials zurückgeführt wird, sowohl messtechnisch erfasst als auch bei der experimentellen Validierung einbezogen wird.