

Schnelle Methode zur Approximation von Druck- und Faserorientierungsverteilung infolge prozess- und materialbedingter Streuungen im Spritzguss

Florian Wittemann, Luise Kärger

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Germany

Summary:

Spritzguss ist einer der industriell wichtigsten Prozesse zur Fertigung von faserverstärkten und unverstärkten Polymeren. Bedingt durch Materialschwankungen, Umwelteinflüsse und Maschinenverschleiß treten allerdings Streuungen in der Bauteilproduktion auf, welche Auswirkungen auf die Bauteilqualität und die -eigenschaften haben. Diese Unsicherheiten führen zu Ausschuss und zur Erhöhung von Sicherheitsfaktoren, was sich negativ auf die Ökobilanz und das Leichtbaupotential auswirkt. Um die Auswirkungen der Unsicherheiten auf Kavitätinnendruck und Faserorientierung quantifizieren zu können, wird mittels CFD-Simulationen in OpenFOAM eine virtuelle Parameterstudie mit variierenden Prozess- und Materialtemperaturen, Faserlängen und Materialzuständen durchgeführt. Auf Basis dieser Parameterstudie werden schnelle Methoden zur Approximation der statistischen Verteilung des Kavitätinnendrucks und der Faserorientierung unter multiplen Parameterschwankungen entwickelt. Die entwickelten Methoden ermöglichen ein effizientes Erzeugen von Prozessstreuändern und stimmen gut mit den Ergebnissen von 3D-Simulationen überein.

Keywords:

Diskontinuierlich verstärkte Polymere, Spritzgussimulation, Prozessstreuung, Approximation

1 Einleitung

Kunststoffe und diskontinuierlich verstärkte Faserverbundkunststoffe (FVK) bilden eine der wichtigsten Werkstoffgruppen für die Automobil-, Unterhaltungs- und Konsumindustrie. Zur Herstellung von (verstärkten) Kunststoffteilen ist der Spritzgussprozess eine der industriell relevantesten Möglichkeiten, vor allem für den Fall, dass eine hohe Anzahl identischer Teile mit komplexer Geometrie gefertigt werden soll. Im Spritzguss werden die Polymere in Schmelzflüssiger Form und unter hohem Druck (bis zu 2000 bar) in eine Kavität gepresst, welche die finale Bauteilgeometrie darstellt. Vor der Plastifizierung liegt der Kunststoff in granularer Form vor, im Falle von FVK sind die Fasern bereits beigemischt.

Auch wenn der Prozess in der Theorie eine Großzahl identischer Teile fertigen kann, unterliegt er Unsicherheiten bezüglich Materialzustand (Feuchtigkeit, Alterung, Faserlänge/-volumengehalt, etc.), Umgebung (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.) und Fertigungsparametern (Werkzeugverschleiß, Parameterschwankungen, etc.). Diese unvermeidbaren Unsicherheiten führen zu Schwankungen in der Bauteilqualität (Dichte, Oberflächenbeschaffenheit, Verzug, etc.) sowie der thermo-mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit, etc.). Vor allem im Falle von FVK hat die sich während dem Prozess ausbildende Faserorientierung signifikanten Einfluss auf die Bauteileigenschaften [1].

Um Bauteileigenschaften in einem frühen Stadium der Produktentwicklung prognostizieren zu können und die generelle Fertigbarkeit zu überprüfen, sind Prozesssimulationen ein wichtiger Aspekt in der Produktentstehung. Es existieren kommerziell verfügbare Softwaretools um den Spritzgussprozess zu modellieren und die Modellierung ist auch Gegenstand der Forschung [2–5], aber alle diese Ansätze sind rein deterministischer Natur und bilden nur einen konkreten Fall einer bestimmten Parameterkonfiguration ab. Zur Abbildung der Material- und Prozessinduzierten Streuung müsste daher eine Vielzahl von individuellen Prozesssimulationen durchgeführt werden, was mit enormen Zeit- und Energieaufwand verbunden ist.

Um dennoch eine Möglichkeit zu haben virtuell Unsicherheiten bezüglich des Prozesses und der Faserorientierung abschätzen zu können präsentiert diese Arbeit schnelle und effiziente Approximationsschemata für Kavitätssinnendruck und finale Faserorientierung im Reaktivspritzguss. Die Schemata basieren auf Interpolation von wenigen vorab durchgeführten Prozesssimulationen in welchen Material- und Werkzeugtemperatur sowie initialer Aushärtungszustand und Faserlänge variiert wurden, um so die Auswirkungen quantifizieren zu können.

2 Prozessmodellierung und Approximation

2.1 Material- und Prozessmodellierung

Die hier gezeigten Simulationsergebnisse wurden mit der Finite-Volumen-basierten open-source Software OpenFOAM durchgeführt. Die zugrunde liegenden Gleichungen wurden in [5] vorgestellt und sind dort im Detail erläutert. Einer der Kernaspekte einer Spritzgussimulation ist die Modellierung der Viskosität. Polymere weisen ein temperaturabhängiges und strukturviskoses Verhalten auf und im Falle von FVK beeinflussen Faservolumengehalt, -orientierung und -länge ebenfalls das Fließverhalten und somit die Formfüllung. Um die Einflüsse von Temperatur, Aushärtungsgrad und Faserlänge in der Prozessmodellierung zu beachten wird die Viskosität als Tensor vierter Ordnung dargestellt, wie in [5] beschrieben. Der Viskositätstensor ist eine Funktion von Faservolumengehalt, -orientierung und -länge sowie der Matrixviskosität, welche mit dem Castro-Macosko-Modell [6] beschrieben wird und somit der Einfluss von Temperatur und Aushärtungsgrad ebenfalls das Viskositätsverhalten und somit die Formfüllung und sich ausprägende Faserorientierung beeinflusst. Die Faserorientierung selbst wird mit Orientierungstensoren nach Advani und Tucker [7] beschrieben und die Orientierungsänderung mit dem RSC-Modell nach Wang et al. [8] beschrieben.

2.2 Parametervariation

Die variierten Parameter sind die Werkzeugtemperatur (T_{tool}), Materialtemperatur (T_{mat}), Faserlänge (LF) und initialer Aushärtungsgrad (C_0), welche individuell um jeweils $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$, $\pm 7,5\%$ und $\pm 10\%$ variiert werden. Die Referenzwerte und maximalen Abweichungen sind in Tab. 1 gegeben. Die betrachtete Kavität ist eine 480 mm lange, 190 mm hohe und 2 mm dicke Rechteckplatte mit zentralem Stangeanguss (Durchmesser 15,5 mm) [9].

2.3 Approximation des Kavitätssinnendruckes

Die Ergebnisse der individuellen Parametervariation sind in Abb. 1 für vier spezifische Punkte in der Kavität dargestellt. Es zeigt sich, dass die relative Druckänderung Δp_{rel} (bezogen auf den Druck der Simulation mit Referenzparametern) nahezu Ortsunabhängig ist. Des Weiteren ist ein linearer

Zusammenhang zwischen Δp_{rel} und der relativen Parametervariation in % $\Delta \lambda_{\text{rel}}$ zu beobachten, wie durch die Regressionsgeraden dargestellt.

Tab. 1: Referenzwerte und maximale Abweichung der variierten Parameter.

| Parameter | Referenzwert | -10 % | +10 % |
|-------------------|--------------|----------|----------|
| T_{tool} | 175 °C | 157.5 °C | 192.5 °C |
| T_{mat} | 120 °C | 108 °C | 132 °C |
| LF | 0.38 mm | 0.342 mm | 0.418 mm |
| c_0 | 10 % | 9 % | 11 % |

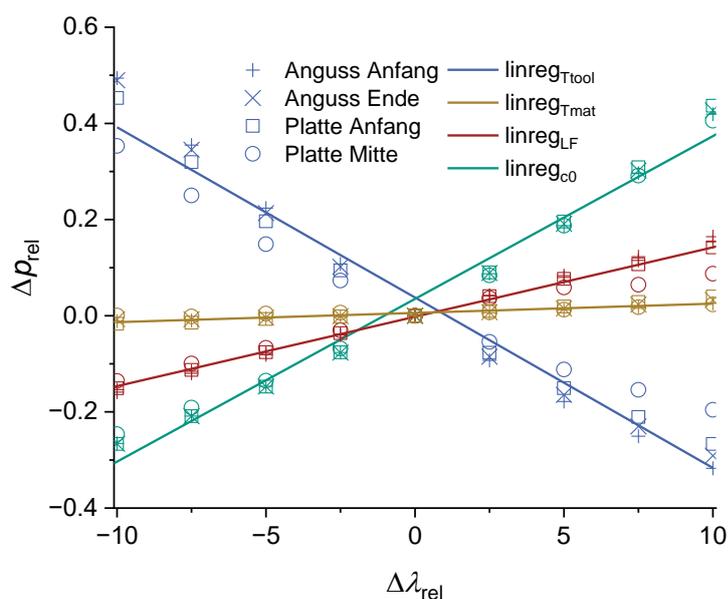


Abb. 1: Relative Druckabweichung für relative Parametervariation von T_{tool} (blau), T_{mat} (orange), LF (rot) und c_0 (grün) und verschiedenen Stellen der Kavität mit zugehöriger Regressionsgerade. [9]

Dementsprechend werden die in Abb. 1 dargestellten Regressionsgeraden zur Bestimmung von Δp_{rel} als Funktion von $\Delta \lambda_{\text{rel}}$ verwendet [9]. Die individuellen Δp_{rel} werden anschließend auf den Referenzdruck p_{ref} addiert um den approximierten Druck p_{apx} zu erhalten. Die Geraden für T_{tool} , und c_0 verlaufen nicht durch den Nullpunkt, da diese Größen den Druck asymmetrisch beeinflussen. Eine jeweilige Änderung um einen bestimmten Wert lässt den Druck stärker steigen, als eine entsprechend negierte Änderung in sinken lässt. Dies lässt sich auf den nicht-linearen Einfluss Temperatur und Aushärtung im Viskositätsmodell zurückführen [5,6].

2.4 Approximation der Faserorientierung

Das Verfahren zur Approximation der Faserorientierung ist ähnlich zur Approximation des Druckes. Die einzelnen Tensorkomponenten A_{ij} (wobei i und $j \in \{1, 2, 3\}$) des Orientierungstensors \mathbf{A} werden für individuelle Parametervariationen separat interpoliert und so die Orientierungstensoren $\mathbf{A}_{T_{\text{tool}}}$, $\mathbf{A}_{T_{\text{mat}}}$, \mathbf{A}_{LF} und \mathbf{A}_{c_0} bestimmt. Die Orientierungstensoren sind an gewisse Restriktionen gebunden, so sind sie zum Beispiel symmetrisch, semi-positiv definit (SPD) und die Summe der Diagonaleinträge muss Eins ergeben. Um sicher zu stellen, dass die interpolierten Tensoren diese Bedingungen erfüllen, wird geprüft ob sie SPD sind und anderenfalls der jeweilige Tensor zu seinem nächsten SPD-Äquivalent transformiert [10,11]. Anschließend werden die Tensoren normiert, um zu garantieren, dass die Diagonaleinträge in Summe Eins ergeben. Die approximierte Faserorientierung \mathbf{A}_{apx} wird anhand des Mittelwertes der Summe von $\mathbf{A}_{T_{\text{tool}}}$, $\mathbf{A}_{T_{\text{mat}}}$, \mathbf{A}_{LF} und \mathbf{A}_{c_0} bestimmt.

3 Deterministische Ergebnisse der Approximation

3.1 Ergebnisse der Druckapproximation

Die Ergebnisse der Approximation des Kavitätensinnendrucks sind in Abb. 2 dargestellt. Zu sehen sind Experimentelle Ergebnisse (Mittelwert in schwarz und Minima/Maxima in grau). Die Nominellen Werte der Experimente entsprechen den Referenzwerten in Tab. 1. Des Weiteren sind fünf Simulationen und Approximationen dargestellt. Eine die möglichst nah am Mittelwert der Experimente liegt (dunkelblau, Mittelwert), sowie möglichst nah am Minimum (rot, Min) und Maximum (grün, Max) der Experimente. Die Eingangsparameter für die drei Simulationen wurden zufällig aus einer Schar von 100 Kurven gewählt, um möglichst gut zu den Experimenten zu passen. Zudem wurden zwei Simulationen durchgeführt bei denen alle vier Parameter um $\pm 5\%$ variiert wurden um einen möglichst niedrigen Druck (gelb) und möglichst hohen Druck (hellblau) zu generieren. Die zugehörigen Approximationen sind in gestrichelten Linien der gleichen Farbe dargestellt und wurden wie in Abschnitt 2.3 erläutert berechnet.

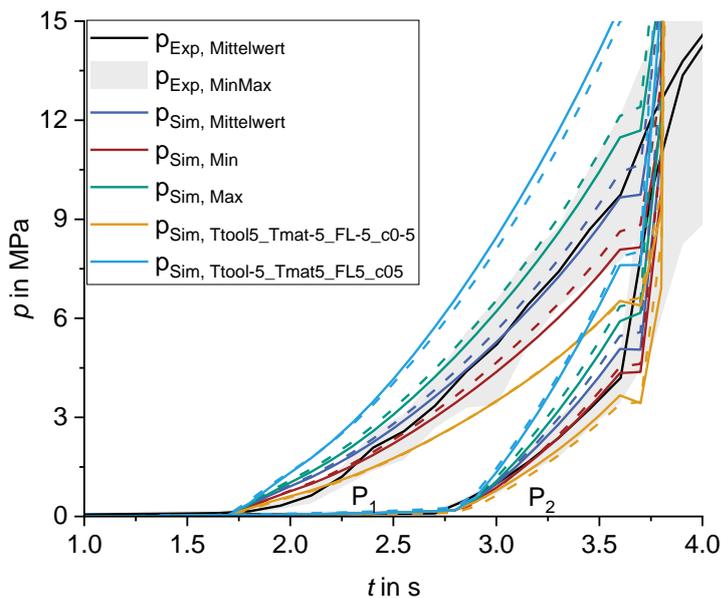


Abb. 2: Kavitätensinnendruck über Zeit in der Platte. Experimentelle Ergebnisse (schwarz und grau), 3D-Simulationen mit verschiedenen Parameterkonfigurationen (durchgezogene Linien) und zugehörige Approximation (gestrichelte Linien) [9]

In Summe zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Approximation, vor allem mit Hinblick auf den starken Grad der Vereinfachung. Die Approximation kann den Kavitätensinnendruck an multiplen Stellen über ein breites Spektrum an Druckverläufen adäquat abbilden. Für Druckverläufe nahe des Referenzzustandes prognostiziert das Schema einen leicht erhöhten Druck im Vergleich zu den Simulationen, wobei die Abweichungen noch als akzeptabel angesehen werden. Durch die zugrundeliegende lineare Funktion ist das Verfahren effizient und benötigt theoretisch nur zwei Simulationen pro Parameter als Input. Das Erstellen einer Vielzahl von Druckverläufen mit beliebigen Parameterkonfigurationen dauert dann nur ein paar Sekunden.

3.2 Ergebnisse der Approximation der Faserorientierung

Die Ergebnisse zur Bewertung der Qualität der approximierten Faserorientierung sind in Abb. 3 in Form der fraktionalen Anisotropie dargestellt. Die fraktionale Anisotropie ist ein Skalarer Wert, welcher mit Hilfe der Eigenwerte des Orientierungstensors berechnet wird, und ermöglicht eine Aussage über den Grad der Orientierung und somit über die Gestalt des Tensors. Eine fraktionale Anisotropie von Eins entspricht einer unidirektionalen Orientierung und ein Wert Null einer quasi isotropen Orientierung. Zur Darstellung in Abb. 3 wurde die fraktionale Anisotropie an Elf gleichmäßig über die Platte verteilten Punkten für die gesamte Plattendicke berechnet und anschließend gemittelt, um so eine Aussage für die komplette Platte treffen zu können.

Abb. 3 zeigt die fraktionale Anisotropie der Referenzsimulation (hellblau), der Approximationen nach Variation von T_{tool} (dunkelblau), T_{mat} (grün), LF (rot) und c_0 (orange) sowie der Superposition (purpur). Die dafür benötigten Orientierungstensenoren $A_{T_{\text{tool}}}$, $A_{T_{\text{mat}}}$, A_{FL} und A_{c_0} sowie A_{ApX} wurden wie in Abschnitt 2.4 beschrieben berechnet. Die Gruppierung $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$, $\pm 7,5\%$ und $\pm 10\%$ gibt an, welche

Simulationen jeweils zur Interpolation in der Approximation verwendet werden. Ziel der Interpolation war immer der Referenzwert (0 %, siehe Tab. 1). Die fraktionale Anisotropie der Referenzsimulation beträgt 0,8038 und ist unabhängig von der Gruppierung immer gleich. Die Werte der individuellen Approximationen stimmen gut mit dem Referenzwert überein, wobei die maximale Abweichung bei $T_{\text{tool}} \pm 10\%$ mit einem Wert von 0,7892 auftritt, was einer Abweichung von ca. 1,8 % entspricht. Somit zeigt sich, dass auch für größere Abweichungen einer Interpolation der Tensorkomponenten möglich ist. Ebenfalls eine Superposition der Ergebnisse stimmt gut mit der Simulation überein wobei die maximale Abweichung wieder bei $\pm 10\%$ liegt und mit einem Wert von 0,7977 nur ca. 0,8 % beträgt. Dies zeigt, dass auch eine Superposition von verschiedenen Orientierungszuständen aufgrund individueller Parametervariationen sinnvolle Ergebnisse liefert.

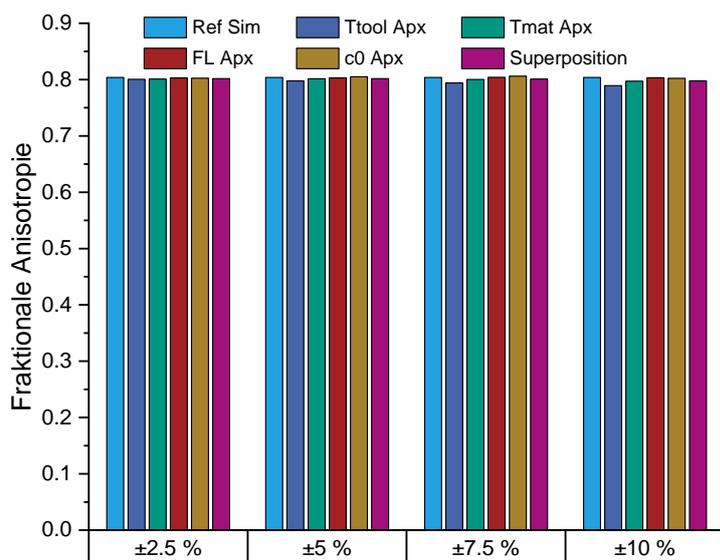


Abb. 3: Gemittelte fraktionale Anisotropie für Referenzsimulation, Parametervariationen und Superposition mit verschiedenen Intervallgrößen

In Summe stimmt die Approximation durch Interpolation gut mit der Simulation überein, auch wenn lediglich die $\pm 10\%$ Simulationen als Input verwendet werden. Eine Approximation der Faserorientierung aufgrund multipler Parametervariationen ist effizient und mit wenigen Referenzsimulationen umsetzbar und liefert gute Ergebnisse.

4 Ergebnisse mit zufällig verteilten Eingangsparametern

4.1 Ergebnisse für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Druckapproximation

Um zu bewerten, ob die Methodik fähig ist, Prozessunschärfen abzubilden, werden 100 Druckkurvenpaare (für P_1 und P_2) mit zufällig verteilten Eingangsparametern erzeugt. Dabei wird für alle vier Parameter T_{tool} , T_{mat} , LF und c_0 die prozentuale Abweichung mit einer Gaußfunktion (Mittelwert = 0, Varianz = 5) zufällig bestimmt. Die zufällige Bestimmung geschieht für jede der 100 Kurven einzeln und für jeden Parameter individuell.

Die Ergebnisse sind zusammen mit den Experimentaldaten in Abb. 4 für die Positionen P_1 und P_2 dargestellt. Der Mittelwert der approximierten Kurven liegt leicht über dem experimentellen Druck, da T_{tool} und c_0 durch den asymmetrischen Einfluss bei niedrigen Abweichungen einen tendenziell zu hohen Druckverlauf prognostizieren (siehe Abschnitt 2.3). Durch die bewusst gewählte und einfache Approximation über eine Gerade, muss dies in Kauf genommen werden, wenn der asymmetrische Einfluss abbildbar sein soll. Dies zeigt sich auch in der Standardabweichung (blaue Balken), welche aufgrund ihrer Definition symmetrisch zum Mittelwert ist, aber näher am Maximalwert als am Minimalwert liegt.

Im Allgemeinen stimmt die in der Approximation vorhergesagte Streuung (Differenz zwischen minimalem und maximalem Wert) für die komplette Zeitspanne gut mit den experimentellen Daten überein. Dies zeigt, dass das Approximationsschema prinzipiell fähig ist, ein Streuband schnell und effizient zu prognostizieren. Dennoch bezieht sich diese Aussage zunächst nur auf den Minimal- und Maximalwert, da im Moment noch nicht genügend experimentelle Daten vorliegen, um eine statistische Auswertung durchführen zu können. Des Weiteren beruhen die als Input verwendeten Gaußfunktionen

auf Erfahrungswerten. Die reale Verteilung von T_{tool} , T_{mat} , LF und c_0 zu bestimmen und zu quantifizieren, ist experimentell aufwendig, wobei die Messungen selbst wieder einer gewissen Unsicherheit unterliegen.

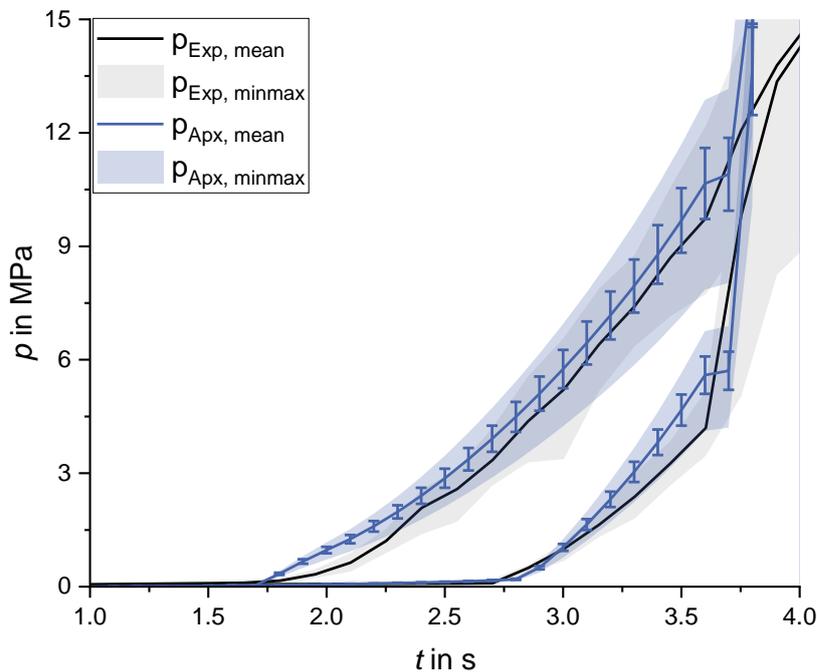


Abb. 4: Experimentelle Druckkurven an P1 und P2 (schwarz) mit zugehörigem Minimal- und Maximalwert (grau), Mittelwert der approximated Druckkurven mit zufälligem Input (blau), mit zugehöriger Standardabweichung und Minimal- und Maximalwert (hellblau) [9]

4.2 Ergebnisse für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der approximated Faserorientierung

Die Approximation der Faserorientierung für zufällige Inputparameter ist mit den Tensorcomponenten A_{11} und A_{22} des Orientierungstensors zweiter Stufe in Abb. 5 über die Plattendicke dargestellt.

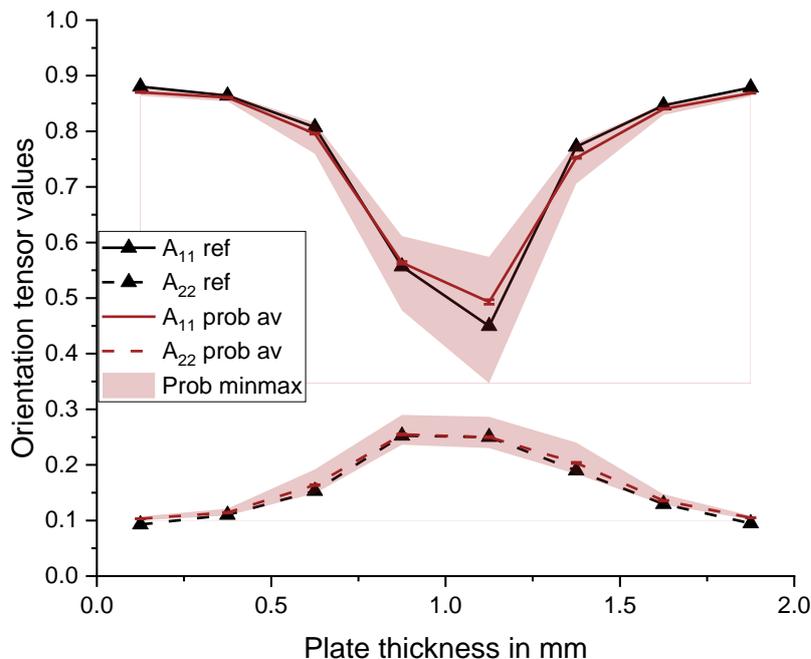


Abb. 5: Simulierte Faserorientierung am Fließwegende in Referenzsimulation (schwarz), Mittelwert der approximated Druckkurven mit zufälligem Input (rot), mit zugehöriger Standardabweichung und Minimal- und Maximalwert (hellrot)

Zur Erzeugung der Approximationskurven wurde die gleiche Verteilung der Inputparameter verwendet, wie auch für die Druckkurven (siehe Abschnitt 4.1). Zur Approximation wurden nur die Simulationen mit einer Abweichung von $\pm 10\%$ verwendet (vgl. Abschnitt 2.4). Der Mittelwert der Approximationen stimmt gut mit der Referenzsimulation überein. Auffällig ist die kleine Standardabweichung (rote Balken) im Vergleich zu dem Streuband der Minimal- und Maximalwerte in der Approximation, was hervorhebt, dass bestimmte Parameterkombinationen zu großen Ausreißern führen können, was signifikanten Einfluss auf das thermo-mechanische Verhalten des Bauteils hätte. Die größere Standardabweichung in der Druckverteilung (siehe Abb. 4) zeigt auch, dass die Druckverteilung sensibler gegenüber der Unsicherheit der Eingangsparameter ist als die resultierende Faserorientierung. Äquivalent zum Druck beruht auch hier die Verteilung der Eingangsparameter auf Erfahrungswerten und der Ansatz muss noch mit einer angemessen großen Zahl an experimentellen Daten validiert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden schnelle und effiziente Verfahren zur Approximation von Kavitätinnendruck und Faserorientierung aufgrund von Prozess- und Materialunsicherheiten vorgestellt. Die Verfahren basieren auf linearer Interpolation von nur wenigen Simulationen, welche in Vorhinein mit bestimmten Parameterkonfigurationen durchgeführt werden müssen. Anschließend kann mit den Verfahren der Kavitätinnendruck und die finale Faserorientierung für eine beliebige Parametervariation, auch bei der Variation multipler Prozess- und Materialparameter gut und schnell approximiert werden. Die Qualität der Approximationen wurde anhand von 3D-Simulationen bewertet, welche mit den jeweiligen Parameterkonfigurationen durchgeführt wurden, und zeigten eine gute Übereinstimmung. Variiert wurden dabei die initiale Werkzeug- und Materialtemperatur, Faserlänge sowie der Aushärtungsgrad. Die Verfahren können nun genutzt werden, um eine Vielzahl von Daten schnell und effizient für eine beliebige Verteilungsfunktion der Eingangsparameter zu erzeugen, was anhand von erzeugten Kurven mit Gaußverteilung als Input gezeigt wurde. Dies ist ein erster Schritt, um Material- und Prozessbedingte Unsicherheiten abbilden zu können, ohne eine Vielzahl von numerisch aufwändigen 3D-Simulationen durchführen zu müssen. Bei bekannter Verteilungsfunktion der Eingangsparameter können die Ansätze auch im Umkehrschluss verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Druckverlaufes oder einer bestimmten Faserorientierung vorherzusagen.

Auch wenn die approximierten Ergebnisse gut mit denen der Simulationen übereinstimmen, sind sie dennoch nur ein erster Schritt, um Prozessunsicherheiten effizient abbilden zu können. In dieser Arbeit wurde lediglich eine einfache Platte betrachtet und die Schemata müssen noch für komplexere Geometrien erprobt werden. Die reale Verteilung und das Ausmaß der Verteilung der jeweiligen Parameter muss quantifiziert werden und die Variation hin zu größeren Abweichungen getestet werden, um eine adäquate Approximation realisieren zu können. Die Variationen weiterer signifikanter Parameter wie zum Beispiel Faservolumengehalt oder Matrixviskosität, welche unter anderem durch Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst wird, sollten in Betracht gezogen werden. Des Weiteren sind die Parametervariationen aktuell konstant in Ort und Zeit und voneinander unabhängig, wobei dies in der Realität nicht der Fall ist und eine gewisse Korrelation besteht. Es existieren andere Verfahren zur Interpolation tensorieller Größen, welche ebenfalls betrachtet werden sollten, da eine simple komponentenbasierte Interpolation der einzelnen Einträge vor allem bei größeren Variationen zu nicht zulässigen Tensoren führen kann [12].

6 Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für Förderung des Forschungsprojektes „MeproSi“ (Projektnummer: 464119659), welche diese Arbeit ermöglicht hat.

7 References

- [1] English S.: "Strukturbildung bei der Verarbeitung von glasfasergefüllten Phenolformaldehydharzformmassen, Universitätsverlag Chemnitz, 2015.
- [2] Tamil, J; Ore, SH; Gan, KY; Ore, SH; Gan, KY; Bo, YY; Ng, G; Wah, PT; Suthiwongsunthorn, N; Chungpaiboonpatana, S: "Molding Flow Modeling and Experimental Study on Void Control for Flip Chip Package Panel Molding with Molded Underfill Technology", International Symposium on Microelectronics, Vol. 2011, No. 1, 2012 // 2011, pp 673–82.
- [3] Ospald F.: "Numerical Simulation of Injection Molding using OpenFOAM", Proc. Appl. Math. Mech., Vol. 14, No. 1, 2014, pp 673–4.

- [4] Wittemann, F; Maertens, R; Bernath, A; Hohberg, M; Kärger, L; Henning, F: "Simulation of Reinforced Reactive Injection Molding with the Finite Volume Method", *J. Compos. Sci.*, Vol. 2, No. 1 (5), 2018.
- [5] Wittemann, F; Maertens, R; Kärger, L; Henning, F: "Injection molding simulation of short fiber reinforced thermosets with anisotropic and non-Newtonian flow behavior", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 124 (105476), 2019.
- [6] Castro, JM; Macosko, CW: "Studies of mold filling and curing in the reaction injection molding process", *American Institute of Chemical Engineers Journals*, Vol. 28, No. 2, 1982, pp 250–60.
- [7] Advani, SG; Tucker, CL: "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites", *Journal of Rheology*, Vol. 31, No. 8, 1987, pp 751–84.
- [8] Wang, J; O’Gara, JF; Tucker, CL: "An objective model for slow orientation kinetics in concentrated fiber suspensions: Theory and rheological evidence", *Journal of Rheology*, Vol. 52, No. 5, 2008, pp 1179–200.
- [9] Wittemann, F; Kärger, L: "Numerical study on uncertainty effects in injection molding", *Proceedings 23th International Conference on Composite Materials (ICCM23)*, 2023.
- [10] Higham, NJ: "Computing a nearest symmetric positive semidefinite matrix", *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 103, 1988, pp 103–18.
- [11] D’Errico J.: "nearestSPD, MATLAB Central File Exchange, retrieved Feb. 28, 2023; Available from: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42885-nearestspd>.
- [12] Krauß, C; Kärger, L: "Tensor interpolation in virtual manufacturing chains for fiber reinforced composites", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 226 (107378), No. 7, 2022.