THEORETISCHE UND PRAKTISCHE UNTERSUCHUNG DER STRÖMUNGSVORGÄNGE IN INJEKTIONSBOXEN FÜR DIE PULTRUSION ANHAND DIMENSIONSLOSER KENNZAHLEN

Felix Tischer

Institut für Kunststoffverarbeitung *
felix.tischer@rwth-aachen.de

13. Dezember 2020

I. EINLEITUNG

Die Pultrusion stellt hinsichtlich Produktivität und Automatisierung ein attraktives Verfahren zur Serienfertigung endlosfaserverstärkter Profile dar. Innerhalb der Pultrusion gewinnt die Injektionsbox-Technologie immer mehr an Bedeutung. Durch den Einsatz von Injektionsboxen wird die Verarbeitung hochreaktiver Harzsysteme ermöglicht und die Emission flüchtiger Harzbestandteile minimiert, was erheblich zum Arbeiterschutz beiträgt. Die Injektionsbox schafft ein geschlossenes System, in dem die Imprägnierung durch geometrische Kompression des Faser-Matrix-Verbundes beschleunigt wird. Gerade um die Injektionsbox-Technologie in der Serienfertigung zu etablieren, fehlt es an Methoden zur Modellierung des Prozesses in Abhängigkeit einer Vielzahl interagierender Parameter. Diese Parameter bestimmen die Strömungsvorgänge und die damit einhergehende Imprägnierung der Faserbündel.

II. PROBLEMSTELLUNG

Das fehlende Prozessverständnis der Injektionsbox-Technologie ist auf die Komplexität des Strömungsfeldes zurückzuführen. Demzufolge wirken Geometrie-, Material- und Prozessparameter sowohl auf die abzugsbedingte Schleppströmung der Fasern als auch auf die kompressionsbedingte Rückströmung der Matrix. Somit überlagern sich Viskositätskraft, Reibungskraft und die jeweiligen Kompressionskräfte innerhalb der Injektionsbox.

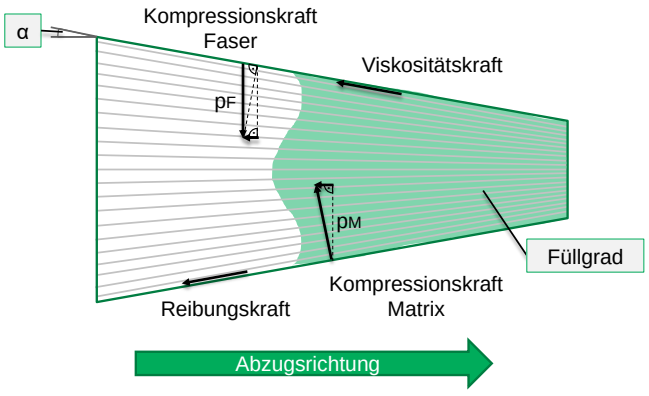

Abbildung 1: *Innerhalb der Injektionsbox wirkende Kräfte*

Die Vielzahl einstellbarer Parameter in Kombination mit der Überlagerung verschiedener Strömungen verhindert eine allumfassende, theoretische Modellierung. So unterliegt die numerische Betrachtung der Injektionspultrusion basierend auf dem Gesetz von Darcy einer Reihe an Vereinfachungen und Annahmen.

Um eine Basis für eine gesamtheitliche Modellierung zu schaffen, beschäftigt sich diese Arbeit mit der Frage nach der Beschreibbarkeit der Strömungsvorgänge in Injektionsboxen anhand dimensionsloser Kennzahlen. Diese Kennzahlen erlauben eine sinnvolle Reduktion der Vielzahl an Parametern aus praktischen Versuchsreihen.

Abbildung 2: *Aufbau der modularen, transparenten Injektionsbox zu Versuchszwecken*

Die zur Ermittlung relevanter Kennzahlen durchgeführten, experimentellen Untersuchungen werden an einer im Vorfeld hergestellten, modularen und transparenten Injektionsbox inklusive Werkzeug durchgeführt. Es werden eingefärbte, nicht-reaktive Testfluide injiziert. Die Auswahl der Testfluide deckt hierbei den unteren Viskositätsbereich von 13,2 mPas bis 245,9 mPas ab und wurde mithilfe von Rotationsrheometer-messungen verifiziert. Für die untersuchten Viskositäten und Faservolumengehalte im Bereich von 57,2% bis 71,2% kann auf Basis der Literatur und durchgeführter Vorversuche von vollständiger Imprägnierung ausgegangen werden.

Neben der Messung der Abzugskraft durch eine schwimmend gelagerte, modulare Werkzeugtechnik ermöglicht die Einfärbung der Testfluide eine optische Analyse des Füllgrades. Diese erfolgt über einen im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus in MATLAB.

* Seffenter Weg 201, 52074 Aachen

Durch die Betrachtung beider Messgrößen wird erstmals die Wechselwirkung des Strömungs- und Kraftfeldes praktisch messbar. Eine Messung der Abzugskraft liefert eine Aussage über in Abzugsrichtung kumulierte Kräfte. Über den Füllgrad und die sich ausbildende Fließfront wird zudem auf die Wechselwirkung von Schlepp- und Rückströmung in und vertikal zur Abzugsrichtung geschlossen.

III. ERGEBNISSE

Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit werden zweistufig durchgeführt. Um das Strömungsfeld grundsätzlich in Abhängigkeit zentraler Imprägnierparameter zu beschreiben, werden Viskosität, Faservolumengehalt und Abzugsgeschwindigkeit in der ersten Stufe variiert. Insgesamt werden Messdaten für 32 verschiedene Konfigurationen aufgezeichnet.

Die Auswertung dieser Messdaten liefert statistische Korrelationen zwischen Abzugskraft und Füllgrad mit den jeweilig variierten Parametern. Konkret liefert die Auftragung des Füllgrades FG für die Variation von Abzugsgeschwindigkeit u, Faservolumengehalt V_f und Viskosität η ein asymptotisches Verhalten. Die Auftragung der Abzugskraft F zeigt für eine Variation der Abzugsgeschwindigkeit u und Viskosität η einen linearen Verlauf, während der Faservolumengehalt V_f exponentiell ansteigt.

Auf Basis dieser Korrelationen wird mittels der Dimensionsanalyse die Kennzahl Π abgeleitet.

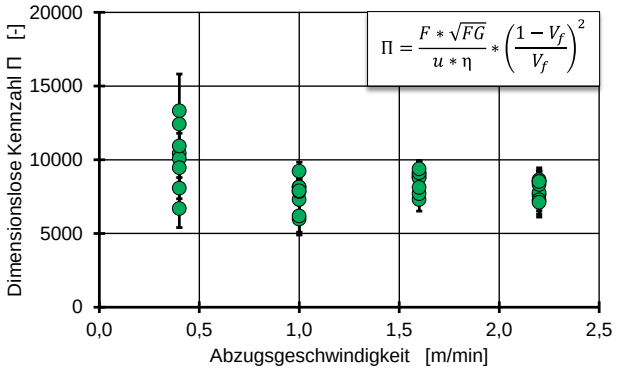

Abbildung 3: *Werte der dimensionslosen Kennzahl Π für die Variation zentraler Imprägnierparameter*

Die zentralen Imprägnierparameter und die zugehörigen Messgrößen Abzugskraft und Füllgrad definieren über die ermittelte Kennzahl Π das elementare Strömungsfeld. Wenn dimensionslose Kennzahlen zweier unterschiedlicher Prozesse per Definition dieselben Werte aufweisen, so werden beide Prozesse durch dasselbe Modell definiert.

Um den Einfluss weiterer, spezifischer Parameter auf das Strömungsfeld zu überprüfen, wird die dimensionslose Kennzahl Π in der zweiten Stufe für die Variation der Oberflächenspannung, des Ortes der Injektion des Testfluids und der Bündelung der eintretenden Rovings durch Verschiebung der faserführenden Lochplatte ermittelt. Hierbei werden 32 weitere Konfigurationen untersucht.

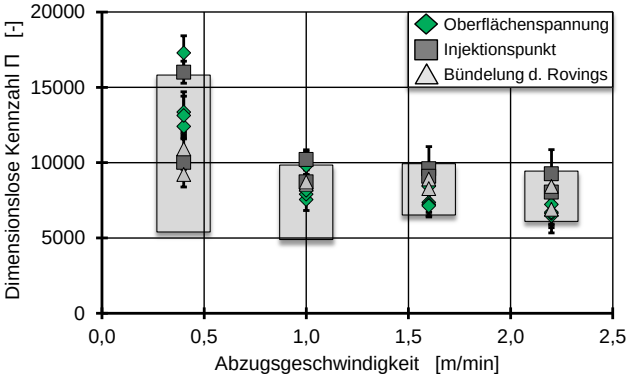

Abbildung 4: *Werte der dimensionslosen Kennzahl Π für die Variation spezifischer Imprägnierparameter im Vergleich zu den durch zentrale Parameter definierten Werten*

Für Abzugsgeschwindigkeiten oberhalb 1 m/min deutet die Ähnlichkeit der dimensionslosen Kennzahl Π für die untersuchten, spezifischen Parameter auf eine Übertragbarkeit des Strömungsfeldes hin. Demnach wäre eine Modellierung des Strömungsfeldes auf Basis der zentralen Imprägnierparameter für die betreffenden Abzugsgeschwindigkeiten ausreichend.

Insbesondere bei einer geringen Abzugsgeschwindigkeit von 0,4 m/min, welche mit einem geringen Füllgrad einhergeht, wird die Abzugskraft von nicht vernachlässigbarer Trockenfaserreibung überlagert.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

In den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit konnte die Übertragbarkeit des von zentralen Parametern beschriebenen Strömungsfeldes für spezifische Parameter grundsätzlich nachgewiesen werden. Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand darin, hierüber eine Basis für die gesamtheitliche Modellierung der Injektionspultrusion zu bilden. Diese Modellierung kann demnach auf Basis der zentralen Parameter Viskosität, Faservolumengehalt und Abzugsgeschwindigkeit erfolgen.

In zukünftigen Arbeiten sollte die Übertragbarkeit des Strömungsfeldes auf weitere Parameter überprüft werden. Allen voran sollte sich hierbei auf die Injektionsboxgeometrie betreffende Parameter konzentriert werden.