

Co-Extrusion neu gedacht

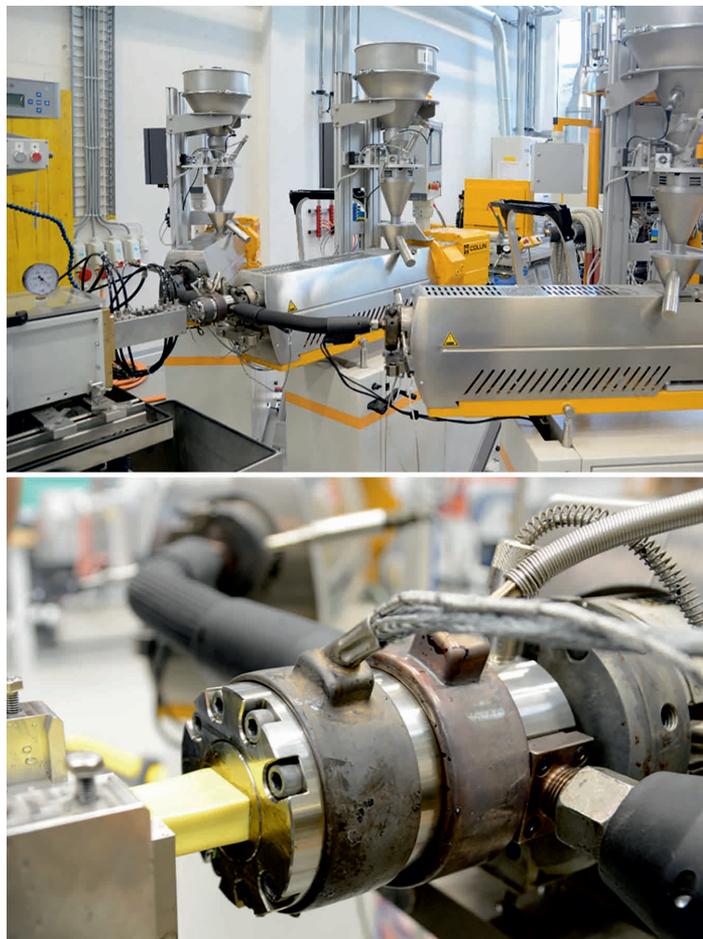
Additive Fertigung und simulationsbasierte Konstruktion als Duo für Extrusionswerkzeuge

Der kombinierte Einsatz von additiven Fertigungsverfahren mit einer digitalen, simulationsbasierten Designprozesskette ermöglicht es, selbst hochkomplexe Extrusionswerkzeuge zeitsparend und wirtschaftlich zu entwickeln. Wie dieses Zusammenspiel funktioniert, haben Experten der Ostschweizer Fachhochschule und der ETH Zürich am Beispiel einer neuartigen Co-Extrusionsdüse erfolgreich getestet.

Statt Extrusionswerkzeuge wie bisher aus mehreren Platten zu erodieren oder zu fräsen, erlauben additive Fertigungsverfahren die Herstellung von komplexen Extrusionsdüsen als monolithische Bauteile. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der Fertigungskosten der Werkzeuge und Verkürzung der Herstellungs- und Lieferzeit. Zudem lässt sich die Konstruktionsfreiheit additiver Verfahren nutzen, um mehrere Strömungsverteiler zu integrieren und neuartige Werkzeuge für die Co-Extrusion von mehrschichtigen Profilen zu realisieren (Bild 1 und 2). Jedoch können die Konstruktion und Auslegung der Werkzeuge eine zeitaufwendige Aufgabe darstellen.

Um die Kosten und den Aufwand für die Konstruktion gering zu halten, ist es erforderlich, eine computerunterstützte Designprozesskette einzusetzen. Hierzu zählen die automatisierte Konstruktion von CAD (Computer Aided Design)-Geometrien sowie der Einsatz von numerischen Strömungssimulationen mit CFD (Computational Fluid Dynamics). Die digitale Prozesskette ermöglicht es, in kurzer Zeit in einer virtuellen Umgebung Düsengeometrien automatisiert zu generieren und die Verteilung der eingebrachten Polymerschmelzen zu simulieren.

Auf diese Weise lassen sich Düsengeometrien simulationsbasiert optimieren und der Aufwand und die Kosten für physikalische Einfahrversuche minimieren. Der Einsatz einer digitalen Designprozesskette ergänzt sich mit den Vorteilen und Freiheiten der additiven Fertigung. Wie beide Technologien gezielt kombiniert werden, demonstriert die Vorgehensweise am Beispiel einer Co-Extrusionsdüse. Die Entwicklung erfolgte als



Im Praxistest: Für den Versuch ist die Co-Extrusionsdüse an drei Extruder angeschlossen und eine Kalibrier-einheit nachgeschaltet © IWK

Zusammenarbeit des Instituts für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Ostschweizer Fachhochschule (OST) mit der Produktentwicklungsgruppe Zürich (pd|z) der ETH Zürich.

Größen und Randbedingungen

Der Designprozess einer komplexen, additiv gefertigten Co-Extrusionsdüse beginnt mit der Festlegung einer Reihe von

Eingangsgrößen (Bild 3). Hierzu zählen die Anordnung der Düsenöffnungen und die Form des extrudierten Profils am Düsenausgang. Im Beispiel ist das Extrusionsprofil definiert durch ein Rechteck, das einen dreischichtigen Materialaufbau besitzt und zwei Hohlkammern beinhaltet. Am Düseneingang erfolgt die Zuführung der Polymerschmelzen über drei runde Eintrittskanäle. Weitere Eingangsgrößen betreffen das zu extrudieren- »

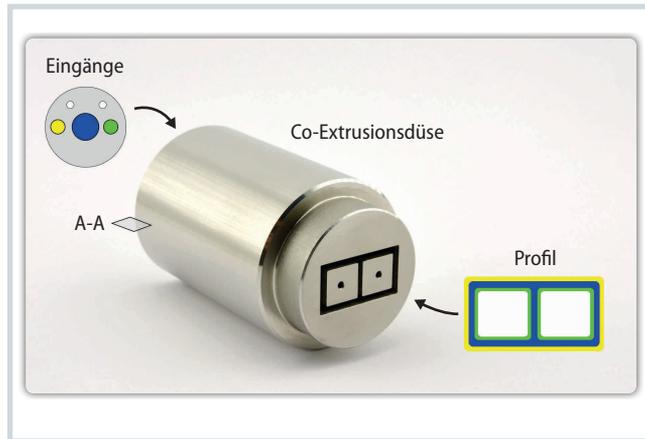


Bild 1. Additive Fertigungsverfahren erlauben die Herstellung von neuartigen Co-Extrusionsdüsen © pd|z

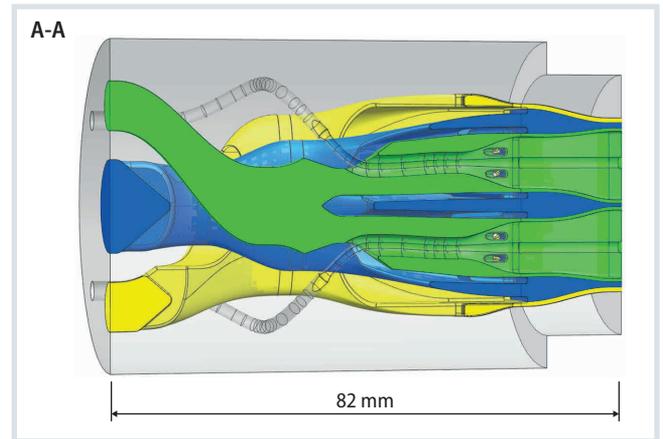


Bild 2. Additiv gefertigte Co-Extrusionsdüsen ermöglichen die Integration von mehreren, ineinander verschachtelten Strömungsverteilern © pd|z

Die Autoren

Manuel Biedermann, M.Sc., ist seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Produktentwicklungsgruppe Zürich (pd|z) an der ETH Zürich;
manuel.biedermann@mavt.ethz.ch

Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt leitet seit 2012 die Produktentwicklungsgruppe Zürich (pd|z) an der ETH Zürich;
meboldtm@ethz.ch

Silvan Walker, B.Sc. MAS, ist seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Ostschweizer Fachhochschule (OST) in Rapperswil-Jona;
silvan.walker@ost.ch

Prof. Dipl.-Ing. Daniel Schwendemann leitet seit 2010 den Fachbereich Materialentwicklung/Compoundierung/Extrusion am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Ostschweizer Fachhochschule (OST) in Rapperswil-Jona;
daniel.schwendemann@ost.ch

Service

Digitalversion

- Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/onlinearchiv

English Version

- Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

de Material und die Prozessbedingungen während der Extrusion. Für das Rechteckprofil basiert das Grundpolymer auf einem Polystyrol (PS) (Styrolution PS 486N), wobei die einzelnen Materialschichten mit je 3% Farbmaterbatch unterschiedlich eingefärbt werden. Zur additiven Fertigung der Düse aus Edelstahl kommt das Verfahren des selektiven Laserschmelzens (engl. Selective Laser Melting) zum Einsatz. Für die additive Fertigung des Bauteils ist die Aufbauichtung entlang der gleichen Achse gewählt wie die Orientierung der Strömungskanäle bzw. Längsachse der Düse.

Automatisierte Konstruktion

Auf Basis der Eingangsgrößen folgt die Konstruktion der Düsengeometrie. Dies erfordert die Erstellung von mehreren, verschachtelten Strömungsverteilern (**Bild 2**). Für die Hohlkammern des Profils sind zudem Kanäle für Luftzuführungen nötig. Um den Aufwand für die Konstruktion zu reduzieren, besteht der Lösungsansatz darin, wiederkehrende und manuelle Schritte zu automatisieren und einen Baukasten mit vordefinierten Designelementen zur Verfügung zu stellen.

Der am pd|z entwickelte Baukasten beinhaltet häufig benötigte Bausteine wie verschiedene Kanalquerschnitte, Strömungsverteiler und Leitbleche. Ein Konstrukteur gibt diese vor; Algorithmen erzeugen anschließend die zugehörige Geometrie des Strömungsverteilers (**Bild 4**). Dies erlaubt die zeiteffiziente Erzeugung und Anpassung von parametrischen Düsengeometrien. Die generierte Düsengeometrie wird im nächsten Schritt über-

prüft bezüglich der Einhaltung von Fertigungsrestriktionen des selektiven Laserschmelzens. Hierzu stellt der Baukasten Routinen bereit, die minimal einzuhalten- de Wanddicken und Aufbauwinkel automatisch kontrollieren. Dies erlaubt die frühzeitige Erkennung von kritischen Geometrieabschnitten, die zu Defekten während der additiven Fertigung führen können. Um ein fertigungsgerechtes Design zu erhalten, werden die zuvor definierten parametrischen Bausteine angepasst und eine aktualisierte Düsengeometrie erzeugt.

Simulationsbasierte Düsenauslegung

Auf Grundlage der fertigungsgerechten Düsengeometrie erfolgt anschließend die Auslegung der Düse mithilfe von Strömungssimulationen (**Bild 5**). Hierzu kommt das Programm Ansys CFX zum Einsatz. Die Polymerschmelzen werden modelliert als stationäre, inkompressible und isotherme Strömungen. Das nicht-Newton'sche Viskositätsverhalten von PS wird mit dem Modell von Carreau-Yasuda beschrieben. An den Eingängen der Düse sind die Massenströme der Polymerschmelzen angegeben. Am Düsenausgang ist eine Druckrandbedingung vorgeschrieben. Kanalwände werden reibungsfrei modelliert und mit einer Haftbedingung festgelegt.

Für die strömungsmechanische Auslegung der Düse werden die einzelnen Strömungsverteiler zunächst separat betrachtet. Für jeden Verteiler berechnet eine Simulation den auftretenden Druckverlust und die Geschwindigkeitsverteilung der Polymerschmelze. Die Simula-

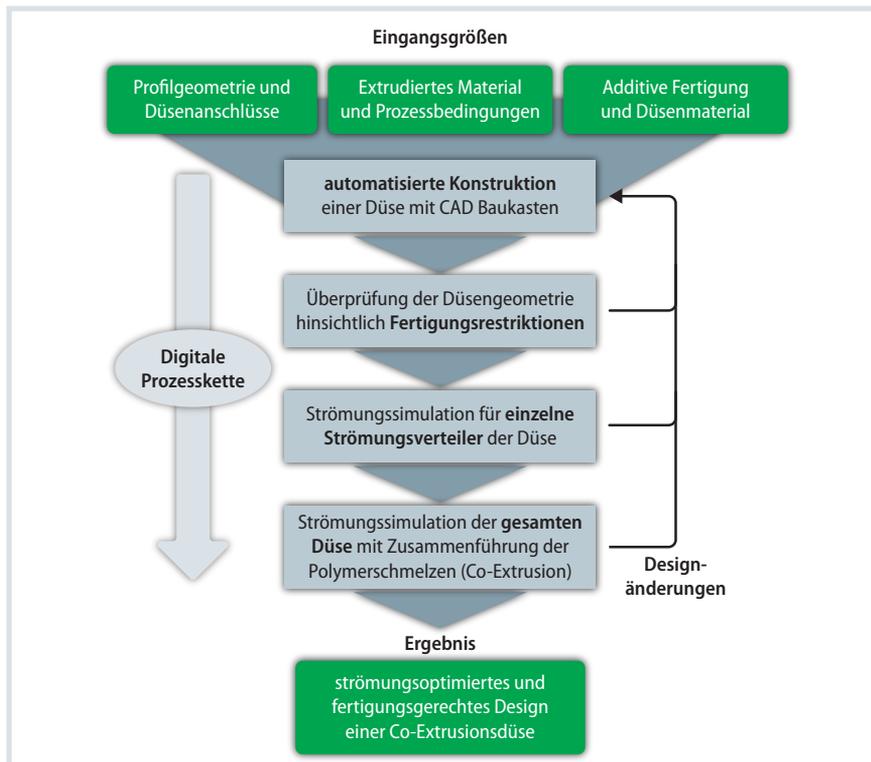


Bild 3. Die Konstruktion von Co-Extrusionsdüsen erfordert den Einsatz einer digitalen Prozesskette mit automatischer Geometrieerstellung und simulationsbasierter Auslegung © pdjz und IWK

gen in der Materialzufuhr standhalten. Die Ergebnisse der Simulationen dienen erneut für iterative und (teil-)automatisierte Änderungen und Verbesserungen der Düsengeometrie (**Bild 3**). Mit dieser Vorgehensweise konnte für das Rechteckprofil eine optimierte Düsengeometrie innerhalb von wenigen Tagen realisiert werden.

Versuchsaufbau und Ergebnis

Für die Validierung der Simulationen wird die Düse mit dem Verfahren des selektiven Laserschmelzens gefertigt. Bei diesem Verfahren verfestigt ein Laserstrahl metallisches Pulver entlang der Bauteilkonturen für jede Schicht des Bauteils. Nach dem Bauprozess wird das Bauteil von nicht verfestigtem Pulver befreit, thermisch nachbehandelt und spanend nachbearbeitet. Die Fertigung der Düse erfolgte bei einem externen Dienstleister innerhalb einer Lieferzeit von einer Woche. Weitere Anschlusssteile, die für die Montage erforderlich sind, werden mit konventionellen Verfahren hergestellt.

Die Durchführung der Experimente erfolgt an den Anlagen des IWK. Im Versuch kommen drei Extruder (Typ: E30PK, L/D30, Hersteller: Collin Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth) zum Einsatz. Für die Zuführung der Hauptschicht wird die Düse direkt an einen der Extruder angeschlossen (**Titelbild**). Die Einspeisung der anderen beiden Extruder erfolgt mit zwei flexiblen Heihschläuchen (Hersteller: Hillesheim GmbH, Waghäusel). Als Extrusionsnachfolge dient eine Kalibrierung mit Kalibriertisch (Hersteller: Bernhard Ide GmbH & Co. KG, Ostfildern) und ein Raupenabzug (Hersteller: Graewe GmbH, Neuenburg am Rhein). Zum »

tionsergebnisse dienen als Basis für Designänderungen der Düse (**Bild 3**). Die Anpassung der parametrisierten Designbausteine erfolgt durch den Konstrukteur oder durch eine automatisierte Optimierungsschleife. Die (teil-)automatisierte Abfolge von CFD Simulationen und Designanpassungen ermöglicht die Reduktion des Druckverlusts und eine Verbesserung der gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung am Ausgang jedes Verteilers.

Nach der Optimierung der einzelnen Strömungsverteiler wird die gesamte Co-Extrusionsdüse mit allen Polymer-

schmelzen analysiert. Eine Mehrphasen-Strömungssimulation erlaubt, die Zusammenführung der Polymerschmelzen am vorderen Düsenabschnitt virtuell zu simulieren (**Bild 5**). Die Drücke aus der Strömungssimulation werden zudem als Randbedingung für eine strukturelle Simulation verwendet. Diese erfolgt mittels FEM (Finite Elemente Methode) und ermöglicht die Berechnung der maximalen Spannungen und Deformationen in der Düse. Neben dem stationären Normalbetrieb muss die Düse unterschiedlichen Betriebszuständen wie dem Anfahren des Prozesses oder Störun-

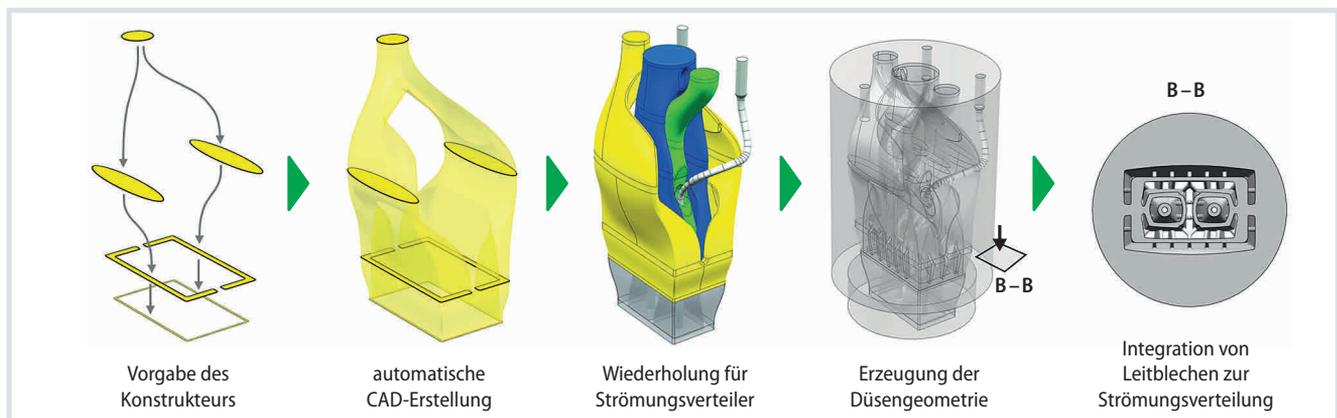


Bild 4. Die Konstruktion komplexer Düsen lässt sich durch die automatische Erstellung von Strömungsverteilern unterstützen © pdjz

Einfahren des Profils werden die Anteile der einzelnen Schichten analog zur Simulation eingespeist und die Massenströme mittels gravimetrischer Durchsatzregelung überwacht. Die Extrusion erfolgt bei einer Liniengeschwindigkeit von 1 m/min und einem Gesamtdurchsatz von 10 kg/h bei einer Masse- und Düsentemperatur von 200°C.

Während des Einfahrvorgangs wird die Geschwindigkeitsverteilung am Düsenaustritt optisch mittels Abstechens des Profils am Austritt analysiert. Am Düsenausgang treten die einzelnen Polymerschmelzen gleichmäßig als co-extrudiertes Profil aus. Die gemessenen Drücke der Massenflüsse (~ 42 bar) sind vergleichbar mit den simulierten Werten (~ 49 bar). Zur Auswertung des extrudierten Profils wird ein Segment eingegossen und eine Schliffprobe erstellt (**Bild 6**). Der Vergleich der vorhergesagten Verteilung der Materialschichten in der Mehrphasen-Strömungssimulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Schliffbild auf Basis des Versuchs. Dieses Ergebnis konnte bereits mit der ersten Designiteration erzielt werden. Durch weitere Anpassungen der Düse ist davon auszugehen, die Schichtverteilung weiter zu verbessern und eine minimale Schichtdicke in allen Bereichen des Profils zu erhalten.

Fazit

Die Kombination von additiven Fertigungsverfahren mit einer automatisierten, simulationsbasierten Designprozesskette ermöglicht die zeitsparende und wirtschaftliche Entwicklung und Umsetzung von Extrusionsdüsen. Der gezielte Einsatz beider Technologien führt zu ei-

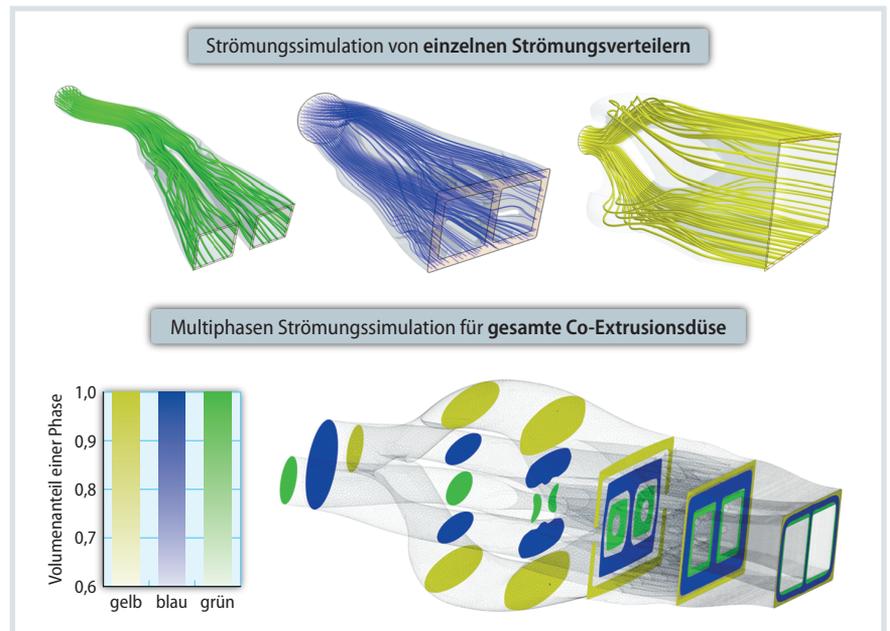


Bild 5. Strömungssimulationen ermöglichen es, die Verteilung der Polymerschmelzen in einzelnen Strömungsverteilern und in der gesamten Düse vorherzusagen © IWK

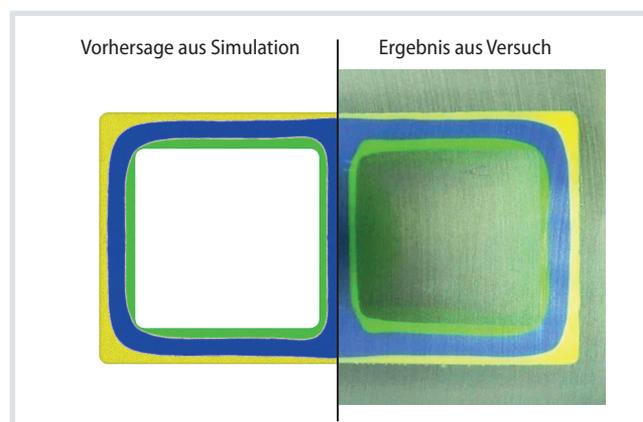


Bild 6. Die Vorhersage der Multiphasen-Strömungssimulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Versuchsergebnis und Schliffbild des extrudierten Profils © IWK

ner drastischen Reduktion der benötigten Entwicklungszeit und -kosten für die Konstruktion, Auslegung und Herstellung von komplexen und funktionsintegrierten Düsen. Im Beispiel führt dies zu einer

sehr kompakten und strömungsoptimierten Co-Extrusionsdüse mit sehr kurzer Lauflänge, die bereits mit der ersten Iteration erfolgreich getestet und validiert werden konnte. ■