

## › Additiv gefertigte Extrusionswerkzeuge

# Innovation in der Profil Co-Extrusion

Mittels Co-Extrusion lassen sich in einem Profil recycelter Kunststoff als Füllmaterial einbringen oder mechanische Eigenschaften mit einer verstärkten Kernschicht verbessern. Die benötigten Werkzeuge sind mit klassischen Verfahren jedoch sehr kostenintensiv zu fertigen. Hierfür bieten nun additive Fertigungsverfahren in Kombination mit einer automatisierten, simulationsgetriebenen Konstruktion neue Potenziale.

› **Manuel Biedermann<sup>1</sup>,  
Mirko Meboldt<sup>1</sup>, Silvan Walker<sup>2</sup>,  
Daniel Schwendemann<sup>2</sup>**

Das Verfahren der Co-Extrusion ermöglicht die kosteneffiziente Herstellung von funktionalen Produkten wie Folien und Profilen, in denen mehrere Materialien mit unterschiedlichen Funktionen und Eigenschaften integriert werden. In einem mehrschichtigen Profil lassen sich zum Beispiel farbliche Markierungen einbringen oder durch eine verstärkte Kernschicht die mechanischen Eigenschaften verbessern. Des Weiteren kann recyceltes Kunststoffmaterial als Füllmaterial im nicht sichtbaren Profilkern eingebracht und wiederverwertet werden. Das Rezyklatmaterial wird dabei mit neuwertigem Kunststoff ummantelt, um eine hohe Oberflächenqualität auf der Aussenschicht eines Profils sicherzustellen. Zudem ist es möglich, eine chemisch resistente Deckschicht aufzutragen oder es lassen sich mit Hilfe eines Haftvermittlers zwei nicht verträgliche Materialien verbinden.

Obwohl die Co-Extrusion viele Vorteile bietet, gibt es in der Entwicklung der benötigten Werkzeuge eine Reihe von Herausforderungen. Die erforderlichen Werkzeuge besitzen in der Regel einen komplexen Aufbau aus mehreren, ineinander verschachtelten Zuleitungen und Strömungsverteilern. Dies resultiert in einer zeitaufwändigen Konstruktion und Auslegung des Werkzeugs. Zudem führen die



Co-Extrusionsdüse mit komplexer Kanalgeometrie, hergestellt aus Edelstahl unter Nutzung des additiven Fertigungsverfahrens des selektiven Laserstrahlschmelzens.

Restriktionen von konventionellen, subtraktiven Fertigungsverfahren zu einem mehrteiligen Plattenaufbau mit hohen Herstellungskosten und erhöhter Lieferzeit. Eine weitere Herausforderung besteht in der Validierung der Werkzeuge, was mehrere Design- und Versuchsiterationen erfordern kann. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, lassen sich neue Technologien einsetzen. Hierzu zählen die Nutzung von additiven Fertigungsverfahren sowie die computerunterstützte Konstruktion und Auslegung.

Der folgende Beitrag verdeutlicht dieses Potenzial am Beispiel einer neuartigen, additiv gefertigten Co-Extrusionsdüse. Die Entwicklung erfolgte aus der Zusammenarbeit der Produktentwicklungsgruppe Zürich (pd|z) der ETH Zürich mit dem Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der OST Ostschweizer Fachhochschule. Im Zuge dessen wurden die Stärken der automatisierten Konstruktion

für die additive Fertigung des pd|z verbunden mit der simulationsbasierten Düsenauslegung und den umfangreichen experimentellen Extrusionsanlagen des IWK.

### Additive Fertigung und digitale Prozesskette

Die entwickelte Extrusionsdüse führt drei Kunststoffmaterialien zusammen, die am Düsenausgang als mehrschichtiges Rechteckprofil mit zwei Kammern extrudiert werden. Zur Herstellung der Düse aus Edelstahl kommt das Verfahren des selektiven Laserstrahlschmelzens (SLM) zum Einsatz. Dieses additive Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass ein Bauteil nicht subtraktiv, sondern Schicht für Schicht durch das wiederholte Auftragen und Schmelzen von metallischem Pulver mit einem Laserstrahl aufgebaut wird. Das nicht verfestigte Pulver wird nach dem Bauprozess entsprechend vom Bauteil entfernt.

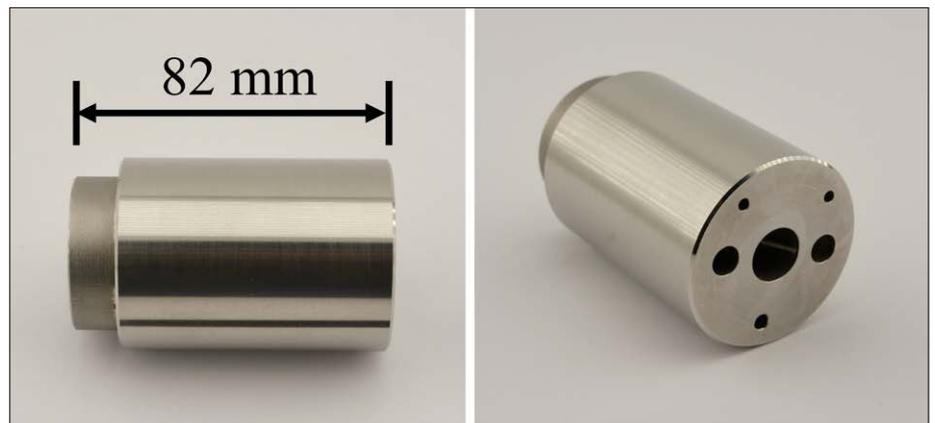
<sup>1</sup> Manuel Biedermann, Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt, pd|z, Produktentwicklungsgruppe Zürich, ETH Zürich  
<sup>2</sup> Silvan Walker, Prof. Daniel Schwendemann, IWK, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung, Ost Ostschweizer Fachhochschule

Die Fertigung der Düse unter Nutzung des SLM-Verfahrens erlaubt die Realisierung von organisch geformten und strömungsoptimierten Schmelzeverteilern. Hierbei lassen sich mehrere Verteiler und Zuleitungen in einem einzelnen, monolithischen Bauteil integrieren, welches eine sehr komplexe Innengeometrie aufweist. Neben den Strömungskanälen zur Verteilung der Polymerschmelzen integriert die Düse zwei weitere Kanäle zur Lufteinspeisung zu den beiden Kammern des Rechteckprofils. Hierbei zeichnet sich die Konstruktion vor allem durch ein sehr platzsparendes und kompaktes Design aus, in dem der Übergang von den Düseneingängen auf den Ausgang mit Rechteckprofil innerhalb einer Länge von nur 82 mm realisiert ist.

Das SLM-Verfahren ermöglicht die kosteneffiziente Fertigung von solchen komplexen Bauteilgeometrien, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur unter sehr hohen Kosten herstellbar sind. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass für die additive Fertigung keine zusätzlichen Formen oder Werkzeuge nötig sind. Dadurch konnte die Co-Extrusionsdüse innerhalb von nur einer Woche von einem externen Partner gefertigt und geliefert werden. Um die Dichtheit von Anschlussflächen zu gewährleisten, erfolgte nach der additiven Fertigung die spanende Nachbearbeitung von Funktionsflächen.

Obwohl das SLM-Verfahren eine sehr grosse Designfreiheit bietet, stellt die Konstruktion von komplex geformten und additiv gefertigten Bauteilen meist einen zeitaufwändigen Prozess dar. Der Grund ist, dass gerade die manuelle Konstruktion von komplexen Freiformen sehr anspruchsvoll und aufwändig ist und in Konstruktionsprogrammen meist viele primitive Designfeature und -operationen kombiniert werden müssen. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein modulares Baukastensystem entwickelt, das dem Konstrukteur vorprogrammierte Bausteine über ein vereinfachtes Nutzerinterface zur Verfügung stellt. Das Baukastensystem beinhaltet zum Beispiel Strömungskanäle, Leitbleche und verschiedene Kanalquerschnitte, um die Konstruktion von Düsen und anderen Fluidbauteilen zu beschleunigen.

Anstatt jeden Strömungskanal der Düse von Grund auf neu zu erstellen, ermöglichen diese höherwertigen Designbausteine



Seiten- und Hinteransicht auf Co-Extrusionsdüse

die schnelle und automatisierte Erzeugung von komplexen Kanälen sowie deren Anpassung für Designiterationen. Durch die Automatisierung von routinemässigen Konstruktionsaufgaben war eine signifikante Reduktion des manuellen Aufwands möglich. Im Falle der Extrusionsdüse liess sich der Konstruktionsaufwand für das Düsensdesign von 5 bis 7 Tagen auf 1 bis 2 Tage verringern. Im Zuge dessen unterstützte der automatisierte Ansatz den Designprozess auch hinsichtlich der Einhaltung von Fertigungsrestriktionen des selektiven Laserstrahlschmelzens.

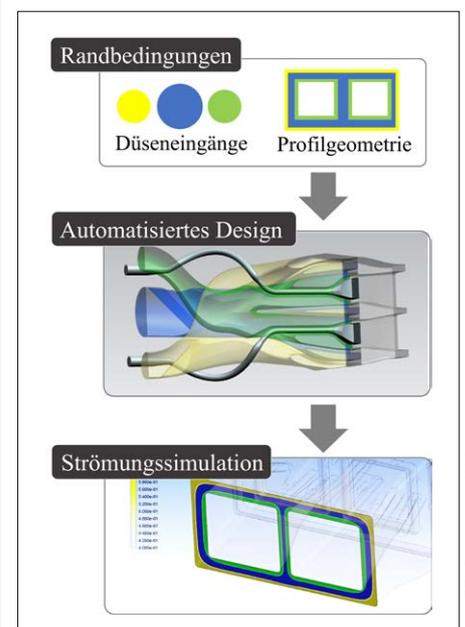
Die automatisch generierten 3D Düsengeometrien dienten als Grundlage für die Auslegung der Düse mit Hilfe von Strömungs- und Struktursimulationen. Strömungssimulationen wurden genutzt, um das Fliessverhalten der Polymerschmelzen (in diesem Fall Polystyrol) innerhalb der einzelnen Strömungsverteiler zu simulieren. Zudem erfolgte eine Analyse des Strömungsverhaltens an der Zusammenführung der drei Polymerschmelzen am vorderen Teil der Düse. Im Rahmen einer iterativen Entwicklung liessen sich mit dem automatisierten Konstruktionsansatz schnell Designänderungen umsetzen und die Funktion der Düse optimieren. Zum Beispiel konnte durch den Einsatz von Leitblechen die gleichmässige Verteilung der Polymerschmelzen am Düsenaustritt gezielt verbessert werden.

Um die Festigkeit der Düse zu analysieren, wurden mechanische Struktursimulationen eingesetzt. Als Randbedingungen dienten die lokalen Drücke basierend auf den Strömungssimulationen. Für die Strukturauslegung wurde das Bauteil insbesondere für spezielle Betriebsbedingungen analysiert.

Hierzu zählte vor allem das Anfahren der Anlage, bei dem die Strömungsverteiler noch nicht gleichmässig durchflossen sind und Kanalwände einer erhöhten Druckbelastung ausgesetzt sind.

## Erfolgreiche Validierung im Versuch

Um die Funktion der Extrusionsdüse zu testen, wurde am IWK ein Validierungsversuch durchgeführt. Zur Extrusion kamen drei Einschneckenextruder mit Durchmesser 30 mm der Firma Collin Lab & Pilot Solutions zum Einsatz. Die einzelnen Polymerschmelzen wurden analog zur Simulation angefahren und der Massenstrom mit einer gravimetrischer Durchsatzregelung überwacht.



Automatisierte Konstruktion und simulationgetriebene Auslegung

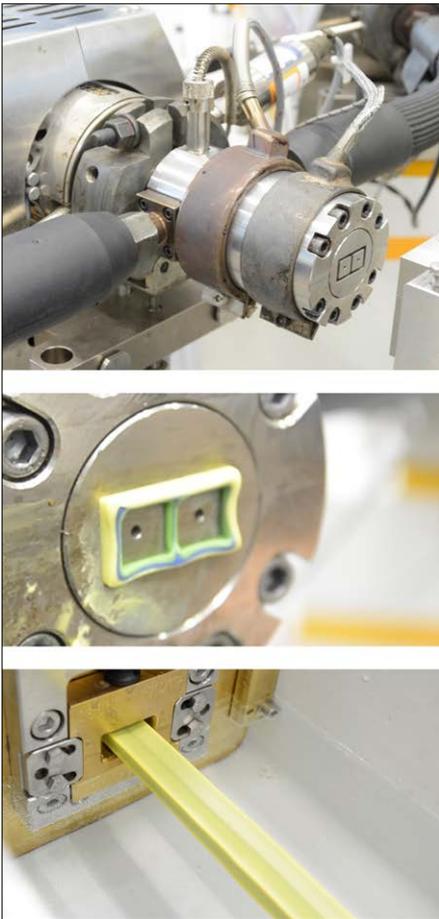


Bild: IWK

Versuchsaufbau und Co-Extrusion des Profils

Die Liniengeschwindigkeit betrug 1 m/min bei einem Gesamtdurchsatz von 10 kg/h. Die Drücke in den einzelnen Kanalzuleitungen lagen zwischen 50 und 200 bar bei einer Masse- und Düsentemperatur von 200 °C. Für die Extrusion des Profils wurden drei verschieden gefärbte Polymerschmelzen über ein Stammwerkzeug in die Düseneingänge geleitet. Die Fertigung des Stammwerkzeugs sowie einer Hülse zur Montage erfolgten mit konventionellen Verfahren.

Im Versuch verlief die Extrusion des Profils bereits mit dem ersten Düsenprototyp erfolgreich. Am Düsenausgang erfolgte der Austritt der Polymerschmelzen in das gewünschte Rechteckprofil. Die einzelnen Polymerschmelzen traten mit gleichmässiger Verteilung aus und es kam zu keinen Defekten oder fehlerhaften Schichten mit unterbrochenen Materialgebieten. Nach dem Austreten aus der Düse wurde das Profil entsprechend durch einen Vakuumtank mit integrierter Nasskalibrierung geleitet.

Um den Querschnitt des Profils zu analysieren, wurden Segmente in Harz eingeg-

gossen und Schliffproben erstellt. Auf Basis dessen erfolgte der Vergleich der Schichtverteilung zwischen der Schliffprobe sowie dem Resultat aus der zuvor durchgeführten Mehrphasen-Strömungssimulation. Im Vergleich zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation. In den gegenübergestellten Schichtverteilungen sind hierbei selbst detaillierte Merkmale wie Abrundungen sowie Änderungen im Verlauf der Schichtdicke zu erkennen.

Als erste Entwicklungsiteration konnte bereits mit diesem ersten Düsenprototyp und Ergebnis die Vorgehensweise erfolgreich validiert werden. Dies zeigt eindrücklich den Mehrwert eines automatisierten und simulationsgetriebenen Konstruktionsansatzes auf, mit dem sich bereits vor einem experimentellen Test eine Vielzahl von Düsenvarianten virtuell analysieren und optimieren liessen. Auf diese Weise gelang es, den manuellen Aufwand, die Kosten und die benötigte Zeit für die Entwicklung der additiv gefertigten Düse signifikant zu reduzieren.

## Viele Vorteile für Anwendungen

Das Demonstratorbeispiel verdeutlicht das Potenzial, das sich ergibt durch die Kombination von additiven Fertigungsverfahren mit einer digitalen Prozesskette. Am Beispiel des Rechteckprofils wurde die Vorgehensweise für die automatisierte Konstruktion, simulationsgetriebene Auslegung und additive Fertigung von neuartigen Extrusionswerkzeugen veranschaulicht. Zusammenfassend ergeben sich folgende Vorteile:

- Realisierung von sehr komplex geformten und strömungsoptimierten Werkzeugen für die Co-Extrusion
- Integration von mehreren Strömungsverteilern in sehr platzsparenden Werkzeugen mit geringer Bauteilhöhe
- Reduktion der Entwicklungszeit durch verkürzte Herstellungs- und Lieferzeit dank additiver Fertigung
- Reduktion des manuellen Aufwands zur Konstruktion komplexer Düsen durch den Einsatz einer automatisierten Designerstellung und eines Baukastensystems mit höherwertigen Designbausteinen
- Gezielter Einsatz von strömungs- und strukturemechanischen Simulationen zur

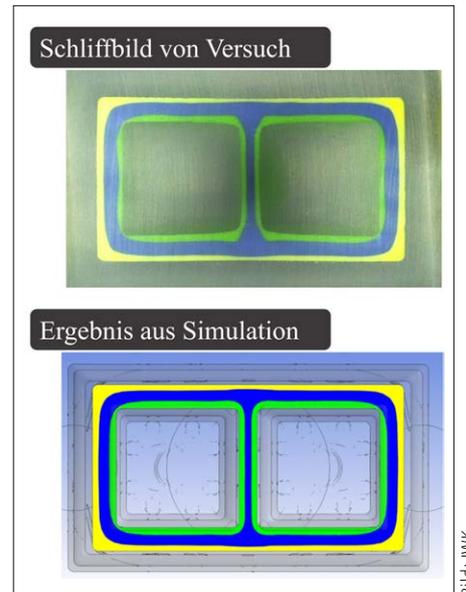


Bild: IWK

Schichtverteilung im Testergebnis und in der Simulation

Analyse und Optimierung von Designkonzepten und Designänderungen als zeit- und kostensparende Alternative zu physikalischen Versuchen

- Entwicklung von Extrusionswerkzeugen zur kosteneffizienten Herstellung von innovativen Multi-Material Produkten mit vielen Vorteilen (z.B. Wiederverwendung von Rezyklatmaterial als Füllmaterial, Verbesserung von mechanischen Eigenschaften durch verstärkte Kernschicht...)

Diese Vorteile gilt es, zusammen mit der Industrie, für verschiedene Anwendungen weiter zu untersuchen. Hierzu sind wir fortlaufend auf der Suche nach Partnern für gemeinsame Projekte und Kooperationen.

## Kontakte

Prof. Dipl.-Ing. Daniel Schwendemann  
IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung  
OST Ostschweizer Fachhochschule  
daniel.schwendemann@ost.ch  
www.iwk.hsr.ch

Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt  
Produktentwicklungsgruppe Zürich pd|z  
ETH Zürich  
meboldtm@ethz.ch  
www.pdz.ethz.ch