

eingereicht/handed in: 20.01.2020
angenommen/accepted: 24.04.2020

Bastian Neubrech, M.Sc.¹, Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg¹, Prof. Dr.-Ing Reinhard Schiffers¹, Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski², Prof. Dr.-Ing Gerd Witt²

¹ Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen (KKM), Universität Duisburg-Essen, Institut für Produkt Engineering (IPE), ² Lehrstuhl für Fertigungstechnik (FT), Universität Duisburg-Essen, Institut für Produkt Engineering (IPE)

Neuartige Werkzeuggeometrien für die Blasfolienextrusion unter Verwendung additiver Fertigungstechnik

Bei der Gestaltung von Extrusionswerkzeugen wird seit Jahren auf bewährte Geometrien, wie beispielsweise Wendelverteiler für die Blasfolienextrusion, zurückgegriffen. Die Auslegung ist vor allem bei komplexen Varianten auch von der fertigungstechnischen Herstellbarkeit abhängig. Mit den heutigen Möglichkeiten der additiven Fertigungstechnik ergeben sich jedoch Potentiale, diese Auslegung der schmelzeführenden Kanäle thermo-rheologisch zu optimieren. Konventionell nicht herzustellende Strukturen und Kanalverläufe können hierbei das Strömungsverhalten positiv beeinflussen. In dieser Arbeit wird ein Demonstratorwerkzeug vorgestellt, welches auf Basis numerischer Strömungssimulationen ausgelegt und weitestgehend additiv gefertigt wurde. Fokus der Auslegung war primär ein verbesserter Temperaturhaushalt durch radiale Mischelemente.

Novel die designs for blown film extrusion involving additive manufacturing

For years, proven concepts such as spiral mandrel dies for blown film extrusion, have been used in extrusion die design. In the case of complex variants, the design also depends on the manufacturability. However, with today's possibilities of additive manufacturing technology, there is potential to optimize this design of the melt-carrying flow channels from a thermo-rheologically point of view. Structures and flow channels that cannot be manufactured conventionally can have a positive influence on the flow behavior. In this paper, a demonstrator tool is presented, which was designed on the basis of numerical flow simulations and manufactured mostly additively. The focus of the design was primarily an improved temperature balance through radial mixing elements.

Neuartige Werkzeuggeometrien für die Blasfolienextrusion durch additive Fertigungstechniken

B. Neubrech, J. Wortberg, R. Schiffers, G. Witt, S. Kleszczynski

1 STAND DER TECHNIK

Bei der Extrusion von Kunststoffen wird ein meist in Granulatform vorliegender, thermoplastischer Kunststoff durch die Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme (Dissipation) aufgeschmolzen. Anschließend wird die Schmelze durch das formgebende Werkzeug gefördert. Durch das Extrusionswerkzeug wird u.a. die Produktqualität (z.B. mechanische Eigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit, Wanddickenverteilung) unmittelbar beeinflusst, wodurch der korrekten Auslegung und Dimensionierung ein hoher Stellenwert eingeräumt wird. Die Forderung nach steigenden Massedurchsätzen im Kunststoffverarbeitenden Gewerbe ist omnipräsent. Damit einhergehend ist auch die Gestalt der formgebenden Werkzeuge über die Jahre stetig komplexer geworden, um die geforderte Produktqualität zu gewährleisten. Hierbei sind unterschiedliche, sich überlagernde Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Nach dem aktuellen Stand der Technik findet die computergestützte Dimensionierung stetig wachsende Anwendung im Auslegungsprozess dieser Werkzeuge. Dennoch findet sich eine Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis, wobei die Vorgehensweise zumeist durch den Einsatz von Erfahrungswissen und einem iterativen Auslegungsprozess geprägt ist [1].

Die additive Fertigung beschreibt das schichtweise Aneinanderfügen von Werkstoff auf Basis von 3D-CAD Daten in einem automatisierten Prozess. Der schichtweise Aufbau des Werkstücks ermöglicht hierbei die Umsetzung neuartiger und komplexer Bauteilgeometrien, welche mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind. Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenqualität bei SLM-gefertigten Extrusionswerkzeugen wurden von Hopmann, Yesildag et al. [2] durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein numerisch optimiertes Werkzeug zur Herstellung von L-Profilen sowohl konventionell als auch additiv gefertigt. Zur Gegenüberstellung der Extrudatqualität wurde die Oberflächenrauheit der extrudierten Profile miteinander verglichen. Das konventionelle Werkzeug weist einen vollständig polierten Fließkanal auf, während das additiv gefertigte Demonstratorwerkzeug lediglich im Lippenbereich auf einer Länge von 15 mm (bei einer Gesamtlänge von 145 mm) nachträglich poliert wurde. Erste Ergebnisse im Labormaßstab mit Massedurchsätzen von bis zu 2 kg/h zeigten, dass der Einsatz von additiv gefertigten Werkzeugen mit polierter Düsenlippe zu roduktoberflächenqualitäten führen, die mit kommerziellen Profilen vergleichbar sind.

2 ZIEL DER ARBEIT

Vor dem Hintergrund der potentiellen Freiheitsgrade ergeben sich offensichtliche Synergieeffekte, da die additive Fertigung für den Dimensionierungsprozess von Extrusionswerkzeugen nachhaltiges Optimierungspotential innehält. Werden die beiden beschriebenen Forschungsfelder aufgegriffen, ergibt sich der Bedarf, den Stand der Technik um neue Werkzeugansätze zur effizienten Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen auf Basis aktueller fertigungstechnischer Möglichkeiten zu erweitern. Die Restriktionen konventioneller Fertigung entfallen, indem „nicht montierbare“ Werkzeuge direkt aus dem CAD-Modell gefertigt werden. Es erschließt sich die Möglichkeit, die Auslegung der schmelzführenden Bereiche eines Extrusionswerkzeuges thermo-rheologisch bestmöglich innerhalb definierter geometrischer Randbedingungen auszulegen. Im Folgenden wird ein alternatives Werkzeugkonzept des Lehrstuhls für Konstruktion und Kunststoffmaschinen, Instituts für Produkt Engineering (Universität Duisburg-Essen) zur Gestaltung einer Primär- bzw. einer Sekundärverteilung einer Blasfolienextrusionsanlage vorgestellt, die durch konventionelle Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind. Die Integration des Wissens zur fertigungsgerechten Auslegung und Nachbehandlung geschieht in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik, das verwendete Verfahren ist ein Laser-Strahlschmelzverfahren. Bevor der eigentliche Auslegungsprozess beschrieben wird, wird nachfolgend auf für die Untersuchung relevante Gestaltungsrestriktionen des verwendeten Verfahrens eingegangen.

3 RESTRIKTIONEN DES LASER-STRAHLSCHMELZENS

Für Anwendungen im Extrusionswerkzeugbau sind vor allem die geometrisch-funktionalen Potenziale additiver Verfahren reizvoll, welche es beispielsweise erlauben, konturnahe Medienführungskanäle einzubringen. Durch die an die Bauteilgeometrie angepasste Temperaturführung lassen sich so Mehrwerte, wie eine erhöhte Verschleißbeständigkeit, Produktivität oder Standzeit des Werkzeuges erreichen. Neben den allgemein anerkannten Vorteilen von AF-Verfahren stehen einer verbreiteten Verwendung von AF-Verfahren in der produzierenden Industrie zum heutigen Zeitpunkt noch einige Handlungsfelder entgegen, welche sowohl technologische als auch wirtschaftliche Aspekte umfassen. Auf der technologischen Seite herrscht vor allem im Bereich der Reproduzierbarkeit der Prozess- und Bauteilqualität [3] sowie bei der Prozessstabilität [4] Handlungsbedarf. Die hohe Anzahl an qualitätsentscheidenden Einflussfaktoren sowie die komplexe Wechselwirkung der Teilbereiche Material, Geometrie-Daten und Prozess-Daten stellen hohe Ansprüche an die Prozessführung und erfordern nach heutigem Stand ein hohes Maß an Erfahrungswissen [5]. Für die nachfolgende Auslegung sind

explizit zwei Effekte zu nennen, die die geometrische Gestaltung restriktions. Zunächst führen überhängende Flächen zu höheren Oberflächenrauheiten [6, 7]. Dieses Phänomen lässt sich auf den Treppenstufeneffekt zurückführen und tritt verstärkt an Flächen mit kleinen Downskin-Winkeln auf und steigt mit zunehmender Schichtdicke. Analog nimmt die Oberflächenrauheit in diesen Bereichen zu. Des Weiteren beeinflusst die Bauteilgeometrie, speziell in Überhangsbereichen, die Wärmeleitungsbedingungen. Das Metallpulver weist eine um drei Größenordnungen geringere Wärmeleitfähigkeit als verfestigtes Material auf. Somit wird der Großteil der eingebrachten Wärmeenergie durch das bereits verfestigte Bauteil abgeführt. Bei überhängenden Geometrien lässt sich jedoch eine vergrößerte Kontaktfläche zum Pulverbett feststellen, wodurch die Wärmeabfuhr reduziert wird und sich das Schmelzebad im Umkehrschluss ausdehnt. Es bilden sich sphärische Strukturen, Pulveranhäufungen oder Schmelzeausläufer.

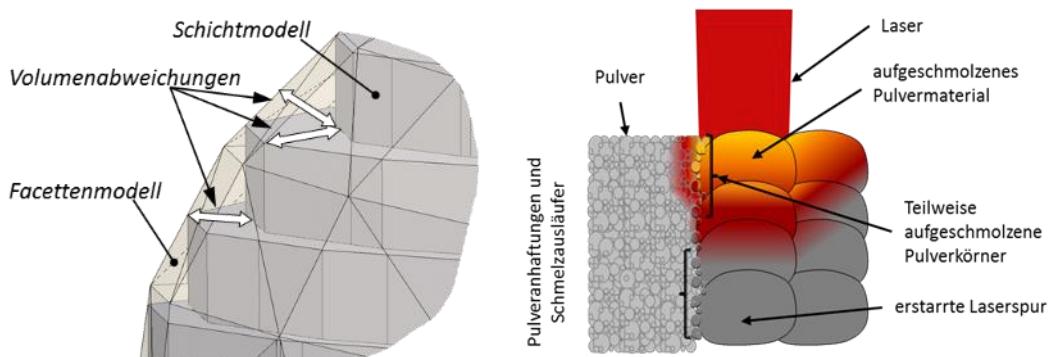


Bild 1: Links: Volumenabweichungen durch die schichtweise Zerlegung [8], rechts: Ausprägung von Pulveranhäufungen und Schmelzeausläufern

Durch eine Optimierung der prozessseitigen Stellgrößen, wie der Pulverpartikelgröße [9], der Konturbelichtungsparameter [10] oder der geometrischen Form [11], können die Auswirkungen anhaftender Partikel auf die resultierende Oberflächenrauheit zwar reduziert, jedoch nicht vollständig unterbunden werden. Dies führt dazu, dass AF-Bauteiloberflächen einer Nachbearbeitung unterzogen werden müssen, sofern die beabsichtigte Funktionalität des Bauteils eine glatte Oberfläche erfordert. Hierfür können bekannte Oberflächenbearbeitungsverfahren, wie das mechanisch-abrasive Strahlen, Gleitspan-Verfahren oder elektro-chemische Polierverfahren verwendet werden [12]. Sofern die betroffenen Oberflächen sich jedoch, wie bei medienführenden Kanälen oder eingeschlossenen Gitterstrukturen, im Inneren des Bauteils befinden und somit für konventionelle Verfahren nicht zugänglich sind, gestaltet sich die technologisch und wirtschaftlich zielführende Nachbearbeitung der betroffenen Regionen problematisch. Diese Restriktionen gilt es im folgenden Auslegungsprozess zu berücksichtigen.

4 PRIMÄRVERTEILUNG

Die grundsätzliche Geometrie von Wendelverteilerwerkzeugen besteht seit den 1960er Jahren und beruht mitunter auch auf den fertigungstechnischen Möglichkeiten dieser Zeit. Vorangetrieben durch den Bedarf an mehrschichtigen Folien und die damit verknüpfte komplexe Schmelzeführung der Teilströme zur Speisung der Wendeln ist die Stern-Primärverteilung die nunmehr meistverwendete Bauform. Dies liegt neben den vergleichsweise kurzen Fließwegen und den geringen Druckverlusten auch an der einfachen Fertigung sowie der Möglichkeit, dass sich Teilströme räumlich kreuzen können [13, 14, 15]. Auf Basis heutiger Fertigungsverfahren ist jedoch zu untersuchen, ob alternative Schmelzeführungskonzepte eine Erweiterung des Prozessverständnisses mit sich bringen und der Auslegungsprozess eine verbesserte Strömungssituation zulässt. Im Folgenden wird speziell der Einfluss der Primärverteilung auf die Strömungszustände sowie die Verweilzeit am Auslass des Extrusionswerkzeuges betrachtet. Dies geschieht mittels numerischer Strömungssimulation.

4.1 Einfluss der Umlenkung auf die mittlere Verweilzeit

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass Umlenkungen von Kunststoffschmelzen auf Grund der strukturviskosen Eigenschaften des Materials bei der Auslegung besonders betrachtet werden müssen. Dies lässt sich durch folgende Phänomene bezüglich Krümmungsradius und Kanalradius, bzw. deren Verhältnis, beschreiben. Nach Stieglitz [16] entspricht der Druckabfall über die Umlenkung annähernd dem über einen geraden Kanal, wodurch maßgeblich die Wandschubspannung zu betrachten ist. Diese nimmt im Verhältnis von Kanalinnenseite zu Kanalaußenseite bei abnehmenden Umlenkungsradien zu, während sich weiterhin das Geschwindigkeitsmaximum aus der Kanalmitte zur Kanalinnenseite verschiebt. Dieses Phänomen wurde bei der automatisierten Werkzeugauslegung ebenfalls von Niemeier untersucht und von te Heesen berücksichtigt [17, 18] und ist in Bild 2 links erkenntlich.

Im Folgenden zeigt sich, inwiefern die beschriebenen Phänomene die mittlere Verweilzeit am Werkzeugauslass eines betrachteten Standardwendelverteilers beeinflussen. Als effizientes Mittel zur Bewertung dient die numerische Strömungssimulation, bspw. mit der kommerziellen Simulationssoftware ANSYS FLUENT. Betrachtet wird ein 4-fach Wendelverteiler mit seitlicher Schmelzespeisung, nachfolgend als Referenzwerkzeug bezeichnet. Nach der Zuleitung wird das Material um 90° umgelenkt und mittels einer Sternvorverteilung in die Wendelkanäle überführt. Um eine effiziente Vernetzung zu gewährleisten wurde das Fluidvolumen im Bereich der Primärverteilung in einfache Geometrieteile zerlegt. Somit konnte in diesen Bereichen ein strukturiertes Netz gewährleistet werden um numerische Fehler und Berechnungszeit zu reduzieren. Die Vernetzung erfolgte mittels bewährter

Elementgrößeneinstellungen und Randschichtvernetzung über acht Schichten. Weitere Informationen zu Netzqualität und Randbedingungen können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Parameter	Wert
Elementanzahl	3 524 706, Randschicht 8 Schichten
Mittlere Schiefe / max. Schiefe	0,19 / 0,95; Standardabweichung 0,15
Durchsatz	50 kg/h
Material	LDPE Sabic 2100N0
Temperaturrandbedingung	isotherm

Tabelle 1: Netzqualität und Randbedingungen

Um nunmehr den Einfluss der Umlenkung auf die mittlere Verweilzeit zu bewerten, wird als geeignete Auswertungsmethodik das mittlere Alter (engl. mean age) herangezogen. Hierbei handelt es sich um die räumlich lokale Verweilzeit, also die im Mittel verstrichene Zeitspanne, die ein Schmelzepartikel benötigt, um vom Einlass in den Kontrollraum zu einem betrachteten Punkt zu gelangen. Als Funktion wird das mittlere Alter über ein User Defined Scalar (UDS) eingebunden und als zusätzliche Transportgleichung gelöst. Weitere Informationen zu der Theorie dieses Ansatzes sowie ein vollständiger Nachweis der Nutzbarkeit wurde bereits von Kummerow untersucht und bewertet [19].

Das mittlere Alter der Schmelze kann im Folgenden für jede Zelle des Fluidvolumens ausgelesen werden. Über das massestromgewichtete mittlere Alter am Auslass wird somit ein Rückschluss auf die mittlere Verweilzeit gezogen. Hier ergibt sich bei genanntem Massestrom ein Wert von 31,9 s, wobei wandnahe Zellen ein wandhaftungsbedingtes höheres Alter aufweisen. Über eine entsprechende Auswerteroutine werden nun gezielt Bereiche am Auslass identifiziert, deren mittleres Alter über der berechneten mittleren Verweilzeit liegt. Ausgehend von diesen Zellen können Stromlinien rückwärts durch das Fluidvolumen gelegt werden. Dies ist in Bild 2 (rechts) erkenntlich. In der Detailansicht wird deutlich, dass diese Stromlinien nahezu vollständig der unteren Querschnittshälfte der Einlassfläche entspringen und somit, wie erwähnt, ungünstige Strömungsbedingungen in der Umlenkung erfahren. Durch die Sternverteilung werden diese Teilströme entsprechend gebündelt und verstärkt in einer Werkzeughälfte in die Wendel geführt.

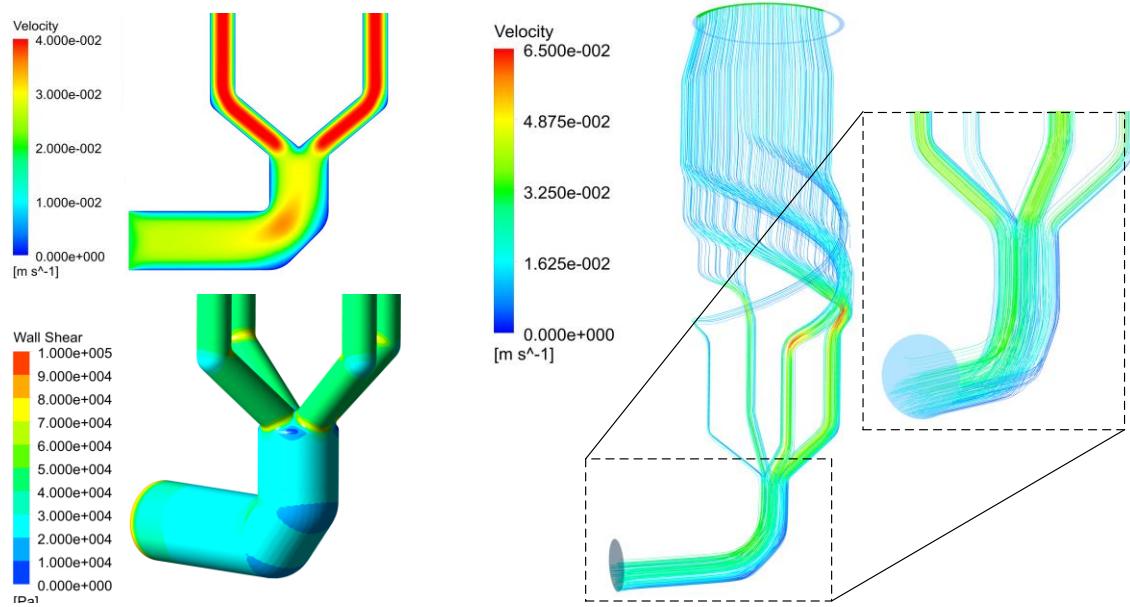


Bild 2: Links: Geschwindigkeit und Wandschubspannung in der Umlenkung, rechts: Visualisierung von Stromlinien überdurchschnittlich hoher Verweilzeit

Grundsätzlich lässt sich somit festhalten, dass neben der grundsätzlichen charakteristischen Verweilzeitverteilung am Auslass von Wendelverteilerwerkzeugen auch Strömungsphänomene aus der Primärverteilung als Einflussfaktoren identifiziert werden können. Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich zwei Potentiale, deren Einfluss bei der Auslegung der additiv gefertigten Primärverteilung untersucht werden:

1. Eine Aufteilung vor der Umlenkung, um Teilströme identischer Schmelzehistorie zu generieren und so vergleichbare Bedingungen für die Sekundärverteilung zu schaffen.
2. Eine Kanalführung der Umlenkung, die durch eine geringe lokale Krümmung eine über den Querschnitt homogenere Schmelzeführung gewährleistet.

4.2 Verbesserte Kanalführung durch fertigungstechnische Freiheitsgrade

Die oben genannten Potentiale führen im weiteren Verlauf zu der Entwicklung einer neuartigen Ausführung einer Primärverteilung für die Blasfolienextrusion. Die Nachfolgezone, bestehend aus Düsenring und Düsendorn, sowie Heizbänder und Werkzeugwagen werden hierbei von dem bestehenden Referenzwerkzeug übernommen. Um die mechanische Integration in die vorhandene Technikumsanlage zu gewährleisten, orientieren sich die geometrischen Grenzen an dem beschriebenen Referenzwerkzeug. Somit

ergeben sich ein definierter Einlassdurchmesser und der Ringspalt vor der Nachfolgezone, sowie der Außendurchmesser der Baugruppe. Letzterer ist zusätzlich durch die vorhandene SLM-Anlage auf 250 mm limitiert, könnte jedoch ohne die Übernahme der Peripherie grundsätzlich reduziert werden und würde so in einer Ersparnis von Pulvermaterial und Prozesszeit der Fertigung resultieren. Die Bauhöhe der Primärverteilung ist anlagenseitig keine kritische Größe, soll jedoch den Wert der bestehenden Primärverteilung nicht überschreiten.

Parameter	Wert
Geforderte Bauhöhe	< 175 mm
Maximaler Außendurchmesser	240 mm
Einlassdurchmesser	35 mm
Auslassdurchmesser	100 mm

Tabelle 2: Geometrische Randbedingungen

Der Endquerschnitt nach der Primärverteilung wird ebenfalls als gegeben definiert und dient als Schnittstelle zur Sekundärverteilung. Als Zielgröße wird ein mittlerer Ringspalt durchmesser von 100 mm bei einer Spaltweite von 10 mm festgelegt. Dies wird begründet durch die in Kapitel 5 vorgestellten Mischgeometrien in der Sekundärverteilung und der daraus resultierenden Mindestspaltweite unter Berücksichtigung der Bauteilfestigkeit.

Zunächst wird, abgeleitet von den zuvor definierten Anforderungen, der Einlaufbereich in das Werkzeug konstruiert. Hierbei werden der Eingangskanalquerschnitt sowie die Passflächen an die Anlage angepasst. Es ergibt sich ein Eingangsdurchmesser gemäß Tabelle 2 vor der Sternaufteilung. Um den Schmelzestrom möglichst gleichmäßig auf die Teilkäne aufzuteilen, wird dieser über einen Zapfen in einen Ringspalt überführt und anschließend mittels Stege in Teilströme separiert (Detailansicht Bild 3, rechts). Für eine möglichst identische Schmelzehistorie muss in der Umsetzung bei einem identischen Kanalquerschnitt eine identischen Kanallänge gegeben sein, die zunächst ermittelt werden muss. Die Auslegung der Kanallänge ist ein Kompromiss aus notwendigem Bauraum für einen sanften Übergang und kurzen Fließwegen, um Verweilzeiten und Druckverbrauch gering zu halten. Da der verfügbare Durchmesser sowie die Bauhöhe zuvor definiert wurden, ergibt sich die Kanallänge vorrangig aus der notwendigen Mindestlänge der beiden oberen Kanäle, da hier die längeren Fließwege zurückgelegt werden müssten. Im Rahmen von Voruntersuchungen, bei denen die Kanallänge iterativ angepasst wurde, stellte sich eine Kanallänge von 150 mm als angemessen heraus.

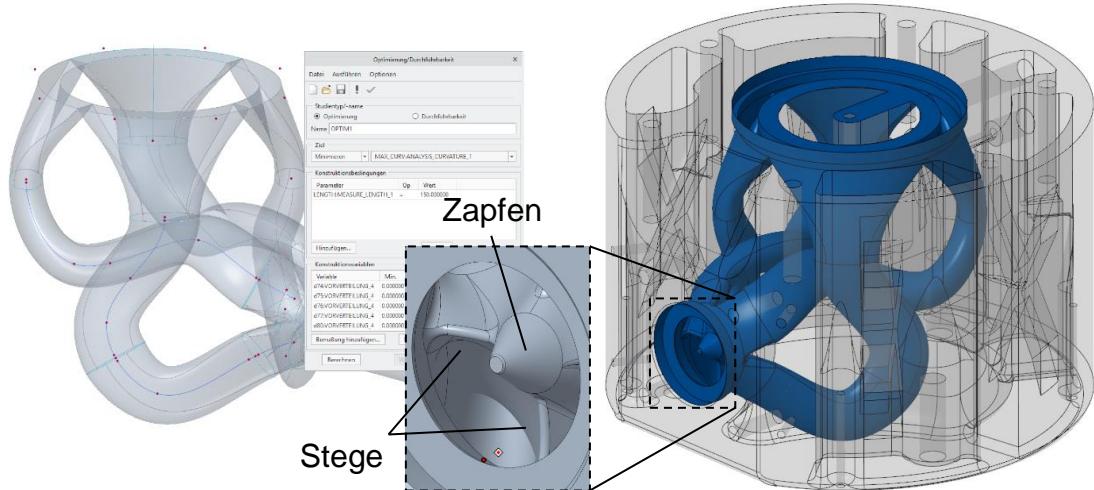


Bild 3: Links: Spline-basierte Optimierung der Strömungskanäle, rechts: Kanalführung innerhalb der Primärverteilung

Im nächsten Schritt wird der tatsächliche Kanalverlauf definiert. Die Leitkurven der Kanäle sind als Kurvensplines über Stützpunkte definiert. Initial werden diesen Stützpunkten Werte im Raum zugewiesen, die über Grenzwerte keine Überschneidung mit benachbarten Kanälen zulassen. Dies ist in Bild 3 (links) exemplarisch erkennbar. Daraus abgeleitet ergibt sich eine Startgeometrie des Schmelzvolumens, deren Verlauf im Folgenden optimiert wird. Die Stützstellen werden der Geometrieoptimierung in der verwendeten Software Creo 5.0 als Gestaltungsvariablen zur Verfügung gestellt und direkt in der CAD-Umgebung angepasst. Mittels einer Optimierungsstudie wird so die lokale Krümmung der Kurvenverläufe minimiert.

In Vorarbeiten wurden CAD - Varianten mit vier, acht und zwölf Kanälen konstruiert und mittels numerischer Strömungssimulation bewertet. Dies geschieht vor dem Hintergrund, über eine entsprechend große Anzahl an Teilkanälen eine gleichmäßige Aufteilung über den späteren Ringspalt zu erzielen. Die Ergebnisse zeigen zwar den gewünschten Effekt, in Form einer homogenen Massenstromverteilung über die einzelnen Kanäle, und ermöglichen eine gleichmäßigere Kanalführung bei steigender Kanalanzahl, jedoch wird für die spätere Fertigung des Demonstratorwerkzeuges auf die Variante mit vier Teilkanälen zurückgegriffen. Begründet wird dies mit dem verfügbaren Bauraum und der Vermeidung von Überschneidungen bei gleichzeitiger Gewährleistung ausreichender Wandstärken und begünstigt außerdem die Vergleichbarkeit mit dem oben beschriebenen Referenzwerkzeug.

Grundsätzlicher Auslegungsansatz für den Kanalquerschnitt ist eine möglichst konstante Wandschubspannung entlang der Fließwege. Zur Auslegung des Durchmessers eines Kanals nach der Sternaufteilung wird die folgende Formel für die Schergeschwindigkeit verwendet. Das strukturviskose Verhalten kann über das Potenzgesetz berücksichtigt werden, wobei der Fließexponent m die doppellogarithmische Steigung der Fließkurve beschreibt

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{R^3 \cdot \pi} \quad \text{Gl. 1}$$

Um eine konstante Wandschubspannung vor und nach der Aufteilung zu erreichen, muss die repräsentative Schergeschwindigkeit in der Zuleitung der repräsentativen Schergeschwindigkeit in jeder Verzweigung entsprechen:

$$\dot{V}_{zul} = \dot{V}_{VZW} \quad \text{Gl. 2}$$

Mit Gl. 1 in Gl. 2 eingesetzt folgt:

$$\frac{4}{R_{zul}^3 \cdot \pi} \cdot \dot{V}_{zul} = \frac{4}{R_{VZW}^3 \cdot \pi} \cdot \dot{V}_{VZW}$$

Mit $\dot{V}_{VZW} = \frac{\dot{V}_{zul}}{n}$, wobei n der Anzahl der Verzweigungen entspricht:

$$R_{VZW} = \frac{R_{zul}}{\sqrt[3]{n}} \text{ bzw. } D_{VZW} = \frac{D_{zul}}{\sqrt[3]{n}} \quad \text{Gl. 3}$$

Wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, gibt es nunmehr bei der additiven Fertigung einige abweichende Besonderheiten zu konventionellen Fertigungsverfahren zu beachten. Wo bei spanenden Fertigungsverfahren zumeist kreisrunde Kanalquerschnitte gewählt werden, da diese durch Standardbearbeitungsverfahren herzustellen sind, bergen diese Querschnitte bei der additiven Fertigung in Abhängigkeit zu ihrer Lage auf dem Baubett durchaus Probleme. Dies gilt vor allem für Bereiche mit lokalen Überhangswinkeln kleiner 45° (vgl. Bild 4), da hier durch ungünstige Abkühlbedingungen Balling-Effekte auftreten können, die in einem Zerfall der Schmelzespur und lokalen Bauteilüberhöhungen resultieren [20]. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Querschnitte in Hinblick auf ihre Strömungscharakteristik untersucht und bewertet. Elliptische Querschnitte bilden auf Basis der strömungs- und fertigungstechnischen Ergebnisse einen guten Kompromiss, sofern bei der Kanalführung auf entsprechende Ausrichtung der Hauptachse in Baurichtung geachtet wird. Somit wurde über den analytisch berechneten Durchmesser aus Gleichung 3 eine flächenäquivalente Ellipse erstellt.

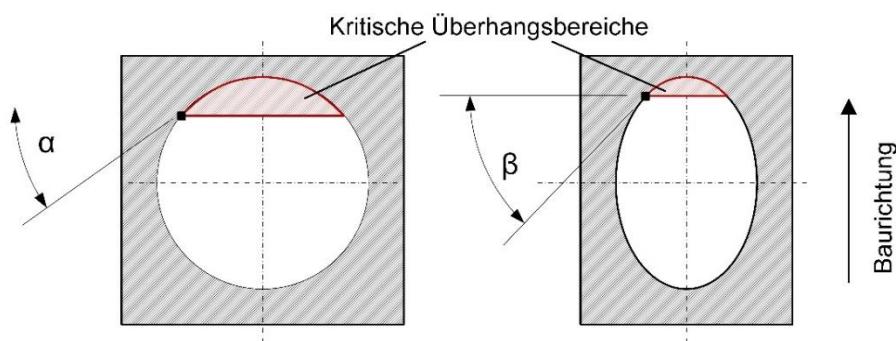


Bild 4: Überhangswinkel bei unterschiedlichen Querschnittsgeometrien

Im weiteren Verlauf wird eine angepasste Art der Leitkurvendefinition innerhalb der Optimierungsschleife notwendig, da die freie Definition über Start- und Endquerschnitte und Stützpunkte entlang des Kurvenverlaufs zu Einschnürungseffekten entlang der Kanäle führte. Dies ist schematisch in Bild 5 dargestellt und liegt an der Verdrehung um die Leitkurve über den Kurvenverlauf.

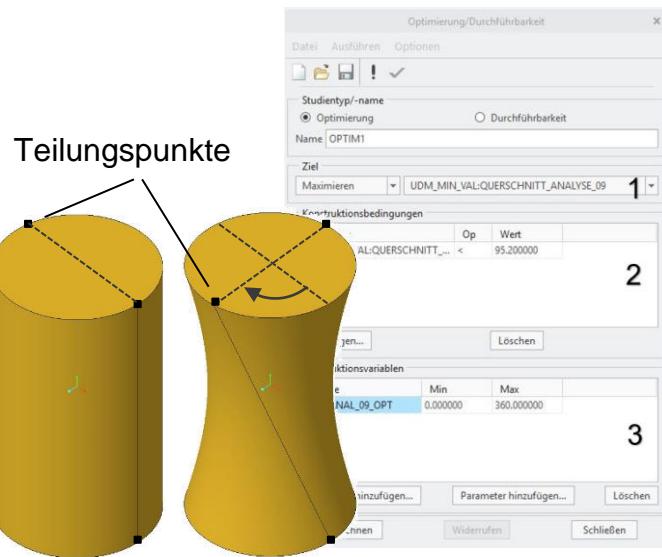


Bild 5: Einschnürungseffekte bei der Kanalerstellung

Um identische Strömungszustände zu schaffen, gilt es diese Einschnürungsbereiche zu vermeiden, da es zu einem unstetigen Druckprofil entlang der Kanäle kommt. Als geeignete Lösung dient ein zusätzlicher Parameter für die Optimierungsstudie. Die Querschnittsfläche wird über ein Mess-Feature innerhalb der CAD-Umgebung gemessen und gespeichert, anschließend erstellt der Optimierer den Kurvenverlauf mit möglichst geringer Abweichung von der berechneten Querschnittsfläche. Als Parameter dient hier der Winkel von Teilungspunkten auf der Querschnittsskizze zu einem Bezugspunkt und wird entsprechend angepasst. Somit können Abweichungen von der Soll-Querschnittsfläche von unter 1% erreicht werden.

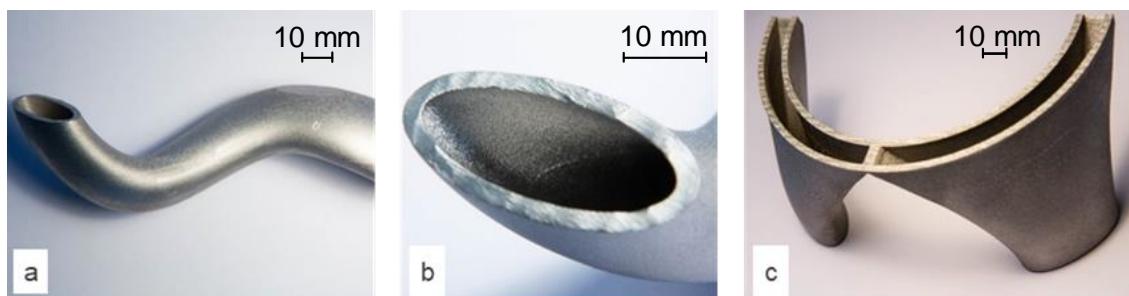


Bild 6: Probekörper Primärverteilung; a) Teilkanal, b) Querschnitt, c) Zusammenführung der Teilkanäle

Über Probekörper in geometriekritischen Bereichen (Bild 6) wurde die Herstellbarkeit für den Gesamtprozess sichergestellt. Exemplarisch wurden die Teilkanäle (a) gefertigt und an kritischen Überhangsbereichen (b) aufgetrennt. Außerdem wurde die Zusammenführung der Teilkanäle (c) überprüft.

4.3 Bewertung mittels numerischer Strömungssimulation

Zur Bewertung der Primärverteilung wird die numerische Strömungssimulation als Werkzeug herangezogen, um die komplexen mehrdimensionalen Strömungsvorgänge zu berechnen. Hierzu wird das erstellte Modell zunächst für die Simulationssoftware vorbereitet. Durch die neuartige Herangehensweise wurde das Modell, abweichend zur konventionellen Werkzeugauslegung, auf Basis der angestrebten Kanalführung ausgelegt und somit direkt als Schmelzvolumen modelliert. Die Umwandlung zu Letzterem entfällt somit als üblicher erster Schritt der Strömungssimulation. Die Vernetzung erfolgt auf Basis bewährter Parameter, die bei Wendelverteilerwerkzeugen vergleichbarer Dimension angewendet werden. Das bedeutet im Detail eine mittlere Elementgröße von 1 mm und einer Randschichtvernetzung über acht Schichten. Das resultierende Netz weist 606 263 Elemente bei einer mittleren Schiefe von 0,22, Standardabweichung 0,12 und einer maximalen Schiefe von 0,94 auf. Bild 7 zeigt die Vernetzung und die angenommenen Randbedingungen der isothermen Simulation.

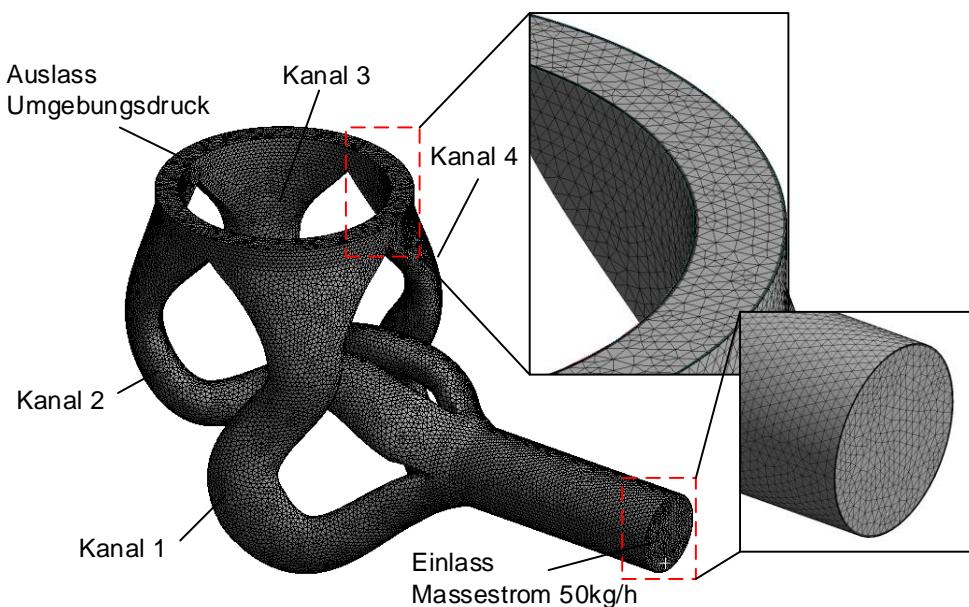


Bild 7: Vernetzung und Randbedingungen der numerischen Strömungssimulation

Die Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit und Wandschubspannung zeigt zunächst die gewünschten Effekte. Die Eingangsströmung wird gleichmäßig auf die vier Teilkanäle aufgeteilt und weist eine über die Kanäle gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit auf (Bild 8, links). Die spiegelt sich auch in der Massestromverteilung wieder, die ausgehend von 50 kg/h am Einlass bei idealerweise jeweils 12,5 kg/h je Teilkanal liegen sollte. Dies wird mit einer maximalen Abweichung von 3,5% erreicht. Des Weiteren zeigt die Auswertung der Wandschubspannung (Bild 8, rechts), dass die analytische Berechnung der Kanalquerschnitte eine Schmelzebelastung vor sowie hinter der Aufteilung in die Teilkanäle in einer verarbeitungsüblichen Bandbreite erzielt. Üblicherweise wird der Bereich von 10 – 100 kPa als dieser definiert und garantiert ausreichende Verarbeitungsqualität ohne Schmelzebruch- bzw. Materialabbauphänomene [17, 18, 21, 22]. Das Falschfarbenbild zeigt, dass Schmelze lediglich in Bereichen entlang der kleinen Radien des Ellipsenquerschnittes eine geringere Wandschubspannung aufweist und diese ansonsten als homogen zu beschreiben ist. Diese Bereiche wurden bereits in Kapitel 4.2 diskutiert und garantieren dennoch die Verarbeitung. Auf eine Auswertung des Druckverlaufs wird an dieser Stelle verzichtet, da der Einfluss auf die Schmelzequalität zu vernachlässigen ist. Außerdem ist eine direkte Vergleichbarkeit mit der konventionellen Referenz nicht gegeben. Die Auswertung wird in der experimentellen Erprobung kurz diskutiert.

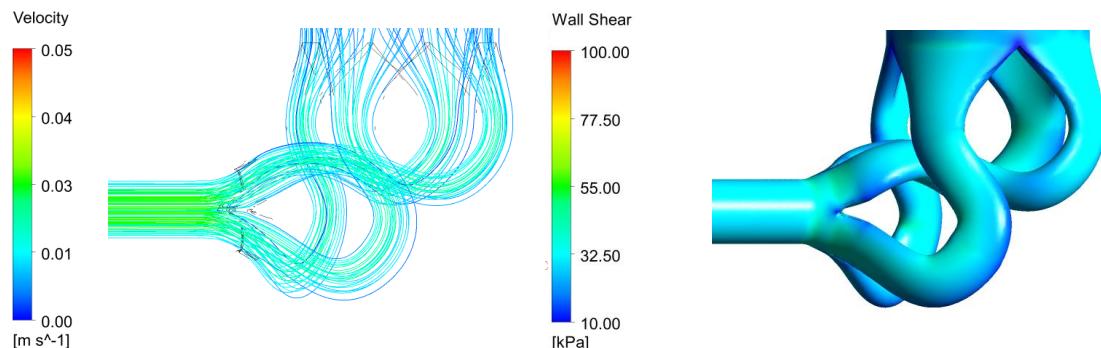


Bild 8: Links: Geschwindigkeitsverlauf über Stromlinien, rechts: Wandschubspannung

Die eingangs definierten Anforderungen an die Primärverteilung sehen eine gleichmäßige Schmelzehistorie über die verschiedenen Teilkanäle vor. Die Belastung auf die Schmelze wurde mit der Auswertung der Wandschubspannung bereits als homogen bewertet, weiterführend wird nun die mittlere Verweilzeit am Auslass der Primärverteilung untersucht. Diese wird erneut mit Hilfe des mittleren Alters als eine skalare Größe berechnet. In Tabelle 3 ist die mittlere Verweilzeit am Auslass der vier Teilkanäle sowie die mittlere Kanallänge aufgeführt. Hierfür wird der massestromgewichtete Wert jedes Teilkanals vor der Aufweitung des Kanalquerschnitts betrachtet, um gegenseitige Beeinflussung zu vernachlässigen.

Kanal	Mittlere Kanallänge	Mittlere Verweilzeit am Auslass
Kanal 1	152,25 mm	27,02 s
Kanal 2	152,28 mm	26,15 s
Kanal 3	152,28 mm	26,16 s
Kanal 4	152,25 mm	27,05 s

Tabelle 3: Mittlere Verweilzeit der Teilkanäle

Die Auswertung zeigt, dass die optimierungsgestützte Auslegung die gewünschten Effekte bezüglich der Kanallängen erreicht, da die mittleren Kanallängen der beiden oberen Kanäle (Kanal 1 und 4 in Bild 7) lediglich um 0,03 mm von den Kanälen 2 und 3 abweichen. In Anbetracht dieser Größenordnung ist die Abweichung zu vernachlässigen. Dennoch weisen diese Kanäle eine geringfügig längere mittlere Verweilzeit am Kanalauslass auf. Dies liegt an der größeren lokalen Krümmung dieser Kanäle aufgrund des geringeren Platzverhältnisses. Nichtsdestotrotz beträgt die Abweichung der minimalen bzw. maximalen mittleren Verweilzeit zueinander lediglich 4 %. Eine vergleichbare Auswertungsroutine der konventionellen Vorverteilung aus Kapitel 4.1 führt bei vergleichbaren Dimensionen zu einer Abweichung von 26 %. Das mittlere Alter am Auslass deckt sich bei allen Auswertungen mit der Berechnung der benötigten Zeit der Schmelze bei bekannter Kanallänge und der jeweiligen mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Mittenströmung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die vorgestellte Primärverteilung ein erfolgreiches Konzept erstellt wurde, auf Basis der additiven Fertigungstechnik neue Auslegungsmöglichkeiten zu nutzen. Bevor die vollständige Werkzeugbaugruppe experimentell erprobt wird, um die vielversprechenden Simulationsergebnisse zu validieren, wird folgend ein Konzeptvorschlag einer neuartigen Sekundärverteilung vorgestellt.

5 SEKUNDÄRVERTEILUNG

Das Funktionsprinzip von Wendelverteilern, als gängige Sekundärverteilung von Extrusionswerkzeugen, beruht auf sich überlagernden Umfangs- und Axialströmungen durch entsprechende Wendel- und Spaltströmungen. Diese zeigen erwiesenermaßen positive Effekte auf die Bindenahtausprägung und somit auch die optischen und mechanischen Produkteigenschaften, allerdings besteht bekanntermaßen ein Problem mit wandnahen Strömungen [18]. Diese verweilen nach dem Einlass in der Wendel an der Gehäuse- respektive Dornwand und bestimmen durch die geringere Strömungsgeschwindigkeit maßgeblich die Verweilzeitcharakteristik. Folglich wäre für eine verbesserte

Verweilzeitcharakteristik, und aus wirtschaftlicher Sicht auch eine Reduzierung der benötigten Spülmasse des Werkzeugs, neben der Umfangsmischung auch radiale Mischung wünschenswert, um wandnahe Schichten an die schneller strömende Mittenschicht zu übergeben. Des Weiteren birgt dies einen positiven Nebeneffekt bezüglich der radialen thermischen Homogenität. Bereits in [18] hat te Heesen simulativ nachgewiesen, dass ein Temperaturgradient zwischen der gehäusenahen und dornnahen Wandschicht in der Nachfolgezone eines vergleichbaren Wendelverteilers auftritt. Begründet wird das durch einen Wärmestau in diesem Bereich, da die Wärme prozessbedingt nicht konvektiv abgeführt werden kann. In axialer Richtung isoliert die Folienblase und in radialer Richtung die Schmelzeschicht. Im Rahmen seiner Untersuchungen wurde in den Bereichen mit einer Wandtemperatur oberhalb der vorgesehenen Schmelztemperatur eine feste Wandtemperatur definiert und so die maximale Schmelztemperatur signifikant reduziert. Dieses Vorgehen simuliert eine potentielle Dorninnenkühlung, jedoch ist ein vergleichbarer Effekt auch durch eine entsprechende radiale Mischung denkbar. Aus [18] kann ebenfalls entnommen werden, dass die beschriebenen Effekte vornehmlich die maximale Schmelztemperatur beeinflussen, da bei einer Erhöhung des Massedurchsatzes die minimale und mittlere Schmelztemperatur, als Verhältnis von lokalen Temperaturen und lokalen Volumenströmen zum Gesamtvolumenstrom, nicht über die Kompensation der induzierten Schererwärmung ansteigen. Somit birgt die radiale Mischung Potential zur thermischen Homogenisierung. Im Folgenden wird also ein Konzeptansatz vorgestellt, welcher eben diese Effekte berücksichtigen soll.

5.1 Steggeometrien zur radialen Mischung von Ringspaltströmungen

Statikmischer sind in der Kunststoffextrusion bekannte Praxis, wenn einer Schmelze flüssige Zusatzstoffe zugeführt werden, oder zwei Schmelzen unterschiedlicher Viskosität gemischt werden [23, 24]. Das Funktionsprinzip beruht dabei stets auf Leitelementen, die den Massestrom aufteilen, umlagern und wieder zusammenführen, und der Einsatz beschränkt sich zumeist auf Rohrströmungen mit entsprechenden Einsätzen. In diesem Bereich gibt es bereits erfolgreiche Konzepte mit der Integration additiver Fertigungstechniken in die Gestaltung [25]. Das bewährte Funktionsprinzip wird im Folgenden auf das Demonstratorwerkzeug übertragen und auf Basis von numerischen Simulationen geometrisch an den Extrusionsprozess angepasst. In einem ersten Segment der Sekundärverteilung steht der Fokus aus den zuvor aufgeführten Gründen auf einer radialen Umlagerung der Kreisringströmung, die von der Primärverteilung bereitgestellt wird. In Bild 9 sind die drei Entwicklungsschritte bis zur finalen Gestalt abgebildet. Hierbei wird zunächst anhand von einfachen Stegelementen das grundsätzliche Funktionsprinzip untersucht. In einem zweiten Schritt werden auf Basis von Simulationsergebnissen Detailoptimierungen an der Ausgangsgestalt vorgenommen. Hierauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen. Die finale

Ausführung besteht aus 40 Stegpaaren, wie im 3. Schritt dargestellt, die sich gleichmäßig auf den Kreisringspalt verteilen.

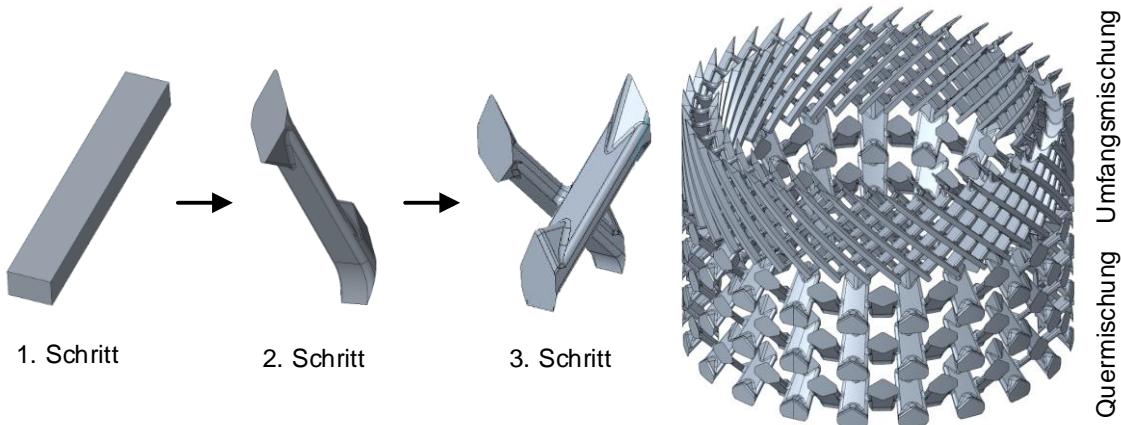


Bild 9: Sekundärverteilung; links: Entwicklung der Steggeometrien, rechts: Gesamtansicht ohne Gehäuse

Bekanntermaßen ist jedoch eine reine radiale Umlagerung der Schmelze für das extrudierte Produkt in Hinblick auf mechanische Festigkeiten in Umfangsrichtung, aber auch für optisch anspruchsvolle Produkt nicht ausreichend. Aus jedem Bereich von zusammengeführten Teilströmen, wie es hinter den Stegpaaren der Fall ist, resultiert eine Bindenähre im Produkt. Dies ist technisch unvermeidbar, wenn eine kreisrunde Strömung über einen Verdrängungskörper in einen Ringspalt überführt werden muss. Jedoch kann der Einfluss der Bindenähre minimiert werden, wie es Wendelverteilerwerkzeuge durch ein Verwischen um den Umfang erreichen. Hierzu wird im zweiten Segment der Sekundärverteilung eine Umlenkung der Schmelze in Umfangsrichtung integriert, die in Ergänzung über drei Schichten entlang des Spaltdurchmessers die Umlenkrichtung ändert. Somit wird ein Verwischen um den Umfang erreicht, ohne die Gefahr von durchgängigen Bindenähren in radialer Richtung.

Auf Basis von Voruntersuchungen am Lehrstuhl für Fertigungstechnik wurden bei der Konzeptionierung einige geometrische Grenzwerte für kritische geometrische Ausprägungen festgelegt, um mechanisches Versagen im Betrieb sowie Prozessfehler in der Fertigung auszuschließen. Ein konventioneller Festigkeitsnachweis gestaltet sich bei additiv gefertigten Produkten schwierig, da einerseits Materialdaten fehlen und die gefertigten Produkte ein anisotropes Verhalten in Abhängigkeit der Bauausrichtung aufweisen. Dies konnte Sehr bereits anhand Untersuchungen zur statischen Festigkeit nachweisen [7]. Zu dynamischen Festigkeitseigenschaften gibt es weniger Erkenntnisse, allerdings wurde in der oben genannten Quelle für den hier verwendeten Werkstoff eine vergleichbare Dauerfestigkeit zu konventionellen Fertigungs routen nachgewiesen. Zu berücksichtigen ist jedoch die Mikrostruktur laserstrahlgeschmolzener Bauteile, da die Restporosität sowie Fehlstellen eventuelle Risseinleitungen begünstigen können [20].

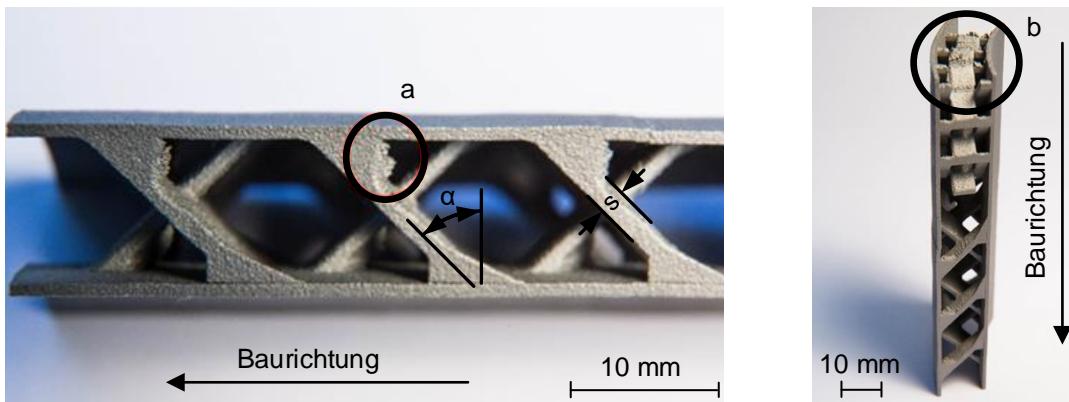


Bild 10: Testgeometrie der Sekundärverteilung; links: Gesamtansicht, rechts: Detailansicht problematischer Geometriebereiche

Für die vorliegende Baugruppe sind, im Bereich des hier betrachteten Strömungskanals, vor allem minimale Stegstärken s sowie Überhangsbereiche (Bild 10, Detail a) und der Neigungswinkel α der Stege als fertigungskritisch identifiziert. Die finale Werkzeuggbaugruppe ist mit einer Stegstärke von 1,5 mm und einem Neigungswinkel der Stege von 45° ausgelegt. Außerdem ist in Abhängigkeit von der Baurichtung, also der Orientierung auf der Grundplatte, der Startbereich der Stege (Bild 10, Detail b) fehleranfällig. Abhilfe schafft hier ein sanftes Anwachsen der Stege aus der Gehäusewand heraus. Anhand der dargestellten Teilsegmente der Sekundärverteilung und des angedeuteten Gehäuses konnte eine Herstellbarkeit sichergestellt und erprobt werden. Die Erkenntnisse aus den Versuchsaufbauten werden für das finale laserstrahlgeschmolzene Bauteil entsprechend berücksichtigt. Auf Besonderheiten der Gehäusegeometrie wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, jedoch galt es hier alle prozessnotwendigen Anschlussmaße im Modell zu berücksichtigen. Für die Montage des Demonstrators wurden alle Passflächen spanend nachbearbeitet. Ein Vergleich zum konventionellen Wendelverteilerwerkzeug ist dem Ausblick zu entnehmen.

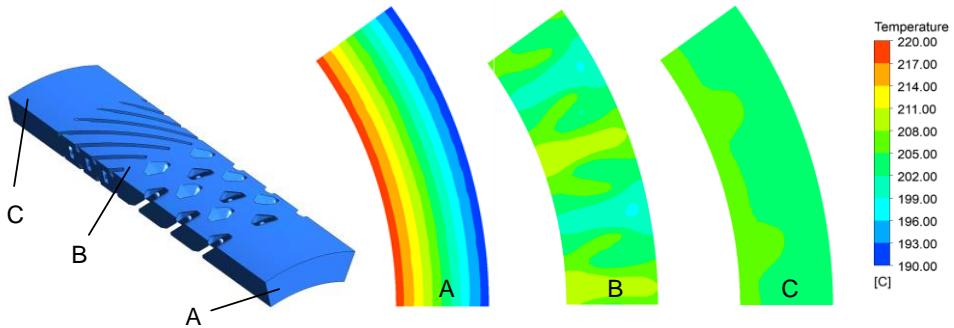
5.2 Untersuchungen zur thermischen Homogenisierung und Bindenahtausprägung

Das Funktionsprinzip der Sekundärverteilung, also der Schmelzeaustrag mit um den Umfang möglichst konstanter Volumenstromverteilung ohne sichtbare Bindenähte, wird ebenfalls auf Basis von numerischen Strömungsberechnungen untersucht und bewertet. Zur ressourcenschonenden Berechnung wurde das Modell auf ein Funktionssegment reduziert, da es sich aus wiederkehrenden Strukturen zusammensetzt. Bei der Vernetzung wird auf die bereits etablierte Vernetzungsstrategie zurückgegriffen. Hieraus resultiert ein Netz mit 1 770 256 Elementen, einer mittleren Schiefe von 0,27, Standardabweichung 0,14 und maximaler Schiefe von 0,96. Bei der Definition

der Randbedingungen gibt es neben den üblichen Größen zwei Besonderheiten zu berücksichtigen:

1. Am Einlass wird ein Temperaturprofil aufgeprägt, um die thermische Mischleistung zu bewerten. Hierbei steigt die Temperatur zwischen Außenwand und Innenwand linear von 190°C auf 220°C an. Um die sonstige Einflussfaktoren auszuschließen sind alle weiteren Wandflächen adiabat definiert.
2. Auf den Seitenflächen wird eine periodische Randbedingung definiert, um den Teilschnitt zu berücksichtigen. Tritt der Fluidstrom auf dieser Fläche aus dem Kontrollvolumen auf, wird er auf der gegenüberliegenden Seite wieder zugeführt und entspricht somit theoretisch dem Fluidstrom eines angrenzenden Segments.

Die sonstigen Randbedingungen sind, abgesehen von der temperaturabhängigen Berechnung, analog zu den vorherigen Berechnungen simuliert. Da das Funktionssegment einen Winkelbereich von 36° abdeckt, wird der Massestrom auf 5 kg/h reduziert. Zunächst werden die bekannten Strömungsgrößen ausgewertet, um das erstellte Modell zu bewerten. Die Auswertungen der Größen *Wandschubspannung*, *Druckabfall*, *Strömungsgeschwindigkeit* und *mittlere Verweilzeit* am Auslass zeigen durchweg zufriedenstellende Ergebnisse innerhalb des zulässigen Verarbeitungsfensters und werden zunächst nicht weiter betrachtet. Fokus der weiteren Auswertung liegt nunmehr auf der thermischen Homogenisierung. Demnach werden die Ergebnisse der temperaturabhängigen Berechnung auf



drei Ebenen entlang des Segments ausgewertet (Bild 11).

Bild 11: Temperaturauswertefläche und Ergebnisse der Strömungssimulation

Auf Ebene A am Einlass zeigt sich erwartungsgemäß der zuvor definierte lineare Verlauf und bildet somit die beschriebenen thermischen Phänomene ab. Ebene B liegt unmittelbar hinter der Querschmischung. Hier kann bereits eine Vergleichsmäßigung der Temperatur beobachtet werden, jedoch ist die radiale Stegkontur deutlich auszumachen und die Mischleistung somit nicht ausreichend. Erst Ebene C, hinter der Umfangsmischung, lässt im Falschfarbenbild eine gleichmäßige Temperatur vermuten. Diese Einschätzung

wird durch die Auswertung der massestromgewichteten Temperatur in den drei Graphen in Bild 12 bestätigt. Deutlich zeigt sich die Verschiebung der Temperaturverteilung zur mittleren Temperatur von 205°C.

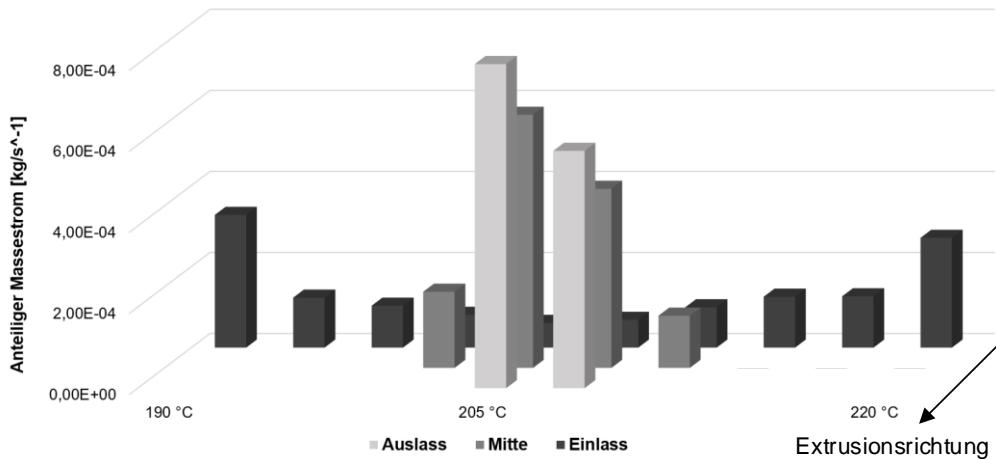


Bild 12: Massestromgewichtete Temperaturverteilung

Auf Basis der gezeigten Ergebnisse lässt sich festhalten, dass die entwickelte Geometrie in der Lage ist, die gewünschte radiale Mischung mit der damit verbundenen thermischen Homogenisierung umzusetzen. Die Auswertung zeigt weiter, dass alles qualitätsbeschreibenden Strömungsgrößen, wie bspw. Wandschubspannungen sowie das Strömungsgeschwindigkeitsprofil am Auslass einen zufriedenstellenden Prozess abbilden. Schlussendlich wird die Produktqualität noch von der Bindenahtausprägung innerhalb der ausgebrachten Folie beeinflusst. Diese ist mittels numerischen Strömungssimulationen nicht ohne weiteres abzubilden, es ist jedoch bekannt, dass festigkeitsschwächende Bindenähte immer aus vollständig radial aufgeteilten Teilströmen resultieren, die in der vorliegenden Geometrie vor allem durch die Stege zur radialen Mischung ausgebildet werden. Aus diesem Grund wird das Modell auf der oben gezeigten Auswerteebene B in Segmente aufgeteilt und davon ausgehend Stromlinien in Richtung Auslass visualisiert (Bild 13).

Durch individuelle Einfärbung der Stromlinien kann zumindest ein Rückschluss auf die Verteilwirkung durch die Umfangsmischung gezogen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die zuvor blockweise angeordneten Stromlinien am Auslass einer verschachtelten V-Form ähneln, dies wird deutlicher, wenn nur 2 Segmente eingeblendet werden (Bild 13, rechts oben). Somit kann vermutet werden, dass die Bindenähte zwischen angrenzenden Blöcken ausreichend egalisiert werden. Eine belastbare Einschätzung hierzu wird jedoch erst nach der Untersuchung der mechanischen Festigkeit von Folienproben aus einem konventionellen Werkzeug und dem Demonstratorwerkzeug getroffen werden können.

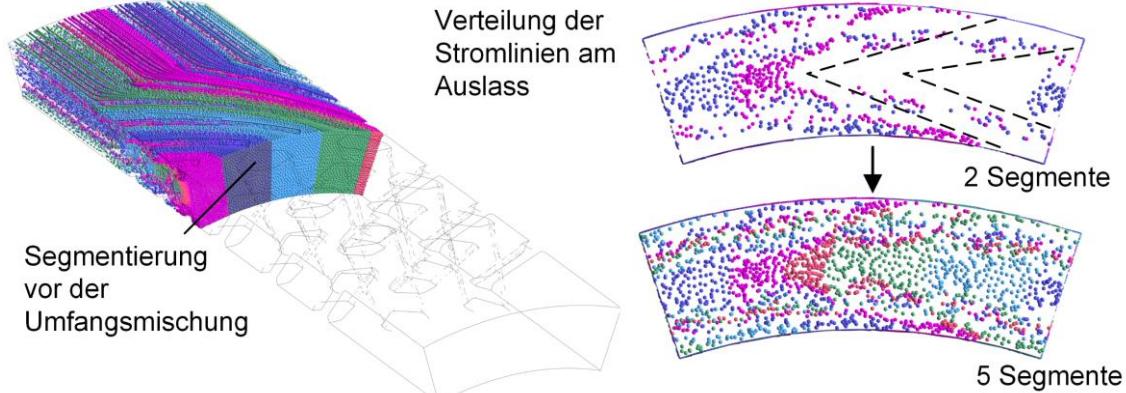


Bild 13: Bewertung der Bindenahtausprägung mittels Stromlinien

6 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass neue Fertigungsverfahren, und damit verbunden neue Möglichkeiten in der geometrischen Auslegung, Potentiale in der Werkzeuggestaltung von Blasfolienextrusionswerkzeugen mit sich bringen. Durch die numerische Strömungssimulation können diese Ansätze untersucht und bewertet werden. Hierzu wurde zunächst für ein bestehendes Referenzwerkzeug der Einfluss der Umlenkung in der Primärverteilung auf die mittlere Verweilzeit am Auslass untersucht. Des Weiteren zeigen temperaturabhängige Simulationen dieser Werkzeugbaugruppe Wärmestaubbereiche in der Sekundärverteilung, die durch geeignete radiale Mischung vermindert werden können.

Die vorgestellte Primärverteilung stellt hierbei ein erfolgreiches Beispiel dar, wie durch neue Freiheitsgrade im Herstellungsprozess eine etablierte Geometrie vorteilhafter für den Strömungsprozess ausgelegt werden kann. Durch splinebasierte Kurvenverläufe kann die Schmelzeströmung gleichmäßig vom Extruder in eine Kreisringströmung überführt werden, während eine vergleichbare Schmelzebelastung über die Teilkanäle eingestellt wird. Durch eine Optimierungsstudie konnten die vier Teilkanäle mit einer annährend identischen Länge, einem identischen Querschnittsprofil und einer minimierten Kurvenkrümmung ausgelegt werden. Dies spiegelt sich auch in einer gleichmäßigen Wandschubspannung über die Kanäle wider, und die durchgeführte Auswertung zeigt einen positiven Einfluss auf die Verweilzeitverteilung an den Teilkanälen.

Anhand der Sekundärverteilung konnte gezeigt werden, dass filigrane Mischstrukturen, wie sie von Statikmischern bekannt sind, eine Möglichkeit zur radialen Mischung darstellen. Durch die thermische Randbedingungen innerhalb der Simulationsumgebung, welche bestehende Prozessprobleme abstrahieren, konnte eine Aussage über die thermische Homogenisierung ohne zusätzliche Temperierung getroffen werden. Durch eine geeignete

Auswertemethodik mittels Stromlinien konnte zudem eine Einschätzung zur Ausprägung von Bindenähten getroffen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Integration von additiven Fertigungstechniken in den Auslegungsprozess von Extrusionswerkzeugen erfolgreich demonstriert werden konnte. In Bild 14 ist zudem eine direkte Gegenüberstellung der beiden beschriebenen Werkzeuge zu sehen, und hierbei wird deutlich, dass die Bauhöhe bei gleicher Durchsatzleistung um 40 % reduziert werden konnte und die Montagekomplexität drastisch reduziert wurde. Dies beeinflusst bspw. Heiz- und Rüstzeiten positiv. Für den Einsatz an der Technikumsanlage wurde die Nachfolgezone vom Referenzwerkzeug übernommen.



Bild 14: Gegenüberstellung eines konventionell gefertigten Blasfolienwerkzeugs (l.), des additiv gefertigten Demonstratorwerkzeugs (m.) und der Strömungssituation innerhalb des Werkzeugs (r.)

Für anknüpfende Arbeiten ist eine umfangreiche experimentelle Erprobung notwendig. Erste Versuche zeigen eine vergleichbare Prozessstabilität, und Betriebspunkte zwischen 10 - 60 kg/h konnten problemlos mit einem PE-LD sowie einem PE-HD angefahren werden. Bei den im Betrieb erfassten Größen ist der Druckabfall auf einem vergleichbaren Niveau zum Referenzwerkzeug. Diesbezüglich sei zu berücksichtigen, dass trotz der reduzierten Bauhöhe das freie Schmelzvolumen des Demonstrators um ca. 35 % größer ist. Dementsprechend zeigen die Simulationsergebnisse für dieses Werkzeug auch eine höhere mittlere Verweilzeit am Auslass. Jedoch haben erste Spülversuche, bei denen die Zeit zwischen der Zugabe eines einfärbenden Masterbatches und dessen Auslass erfasst wurde, ein vielversprechendes Verweilzeitspektrum gezeigt, welches sich positiv auf den Spülprozess auswirken kann. Dies ist auch in den Simulationsergebnissen wiederzufinden. Bild 15 zeigt den anteiligen Massestrom über das Verweilzeitspektrum. Für das

Referenzwerkzeug ist eine bekannte Charakteristik zu erkennen, wobei sich das Spektrum aufgrund der langsam fließenden Wendelströmungen weit auffächert und den Spülprozess maßgeblich beeinflussen. Für das Demonstratorwerkzeug ist eine grundsätzliche Verschiebung zu höheren Verweilzeiten zu erkennen, was jedoch aufgrund des Schmelzvolumens zu erwarten war. Dennoch stellt sich ein schmaleres Verweilzeitspektrum ein. Diese Ergebnisse sollen jedoch aktuell noch über die Auswertung von Farbsensordaten quantitativ belegbar werden. Ergänzt werden diese Daten durch die Messung der mechanischen Eigenschaften von Folienproben der bisherigen Versuche sowie von Proben aus den Referenzversuchen.

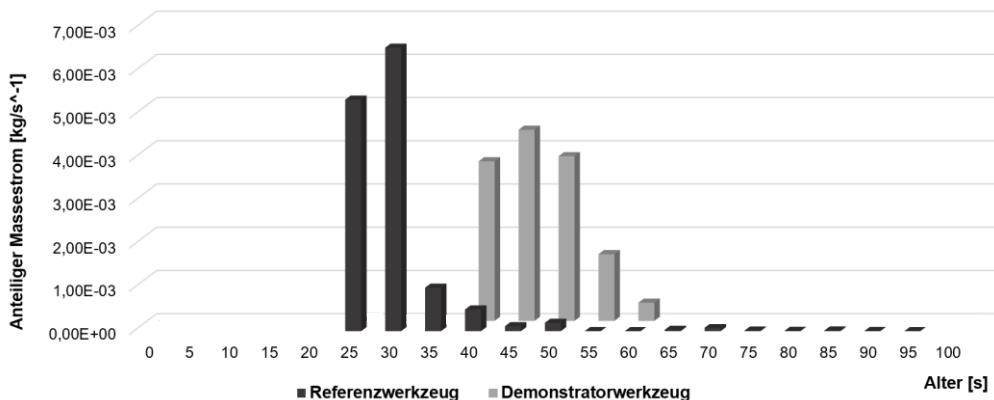


Bild 15: Gegenüberstellung der Verweilzeitcharakteristiken der Werkzeuge

Die bisherige Erprobung wurde vollständig mit einer Kanaloberfläche durchgeführt, wie sie sich nach dem Strahlschmelzprozess einstellt und liegt somit erfahrungsgemäß mindestens um den Faktor 10 über den üblichen Oberflächenrauheiten schmelzeführender Kanäle. Der Lehrstuhl für Fertigungstechnik hat im Rahmen des Projekts Untersuchungen zu Belichtungsstrategien und einer nachgeschalteten Prozesskette durch mechanisch-abrasive sowie elektrochemische Nachbearbeitungsverfahren durchgeführt. Diese Verfahren wurden jedoch bisher nur an abstrahierten Probenkörpern angewendet und fanden noch keine Berücksichtigung bei dem Demonstratorwerkzeug. Dementsprechend muss nunmehr eine geeignete Nachbehandlung der tatsächlichen Fließkanalflächen stattfinden und der Einfluss auf den Prozess untersucht werden.

Für Folgeprojekte erscheint es zielführend die verwendeten Auslegungs- und Simulationsmethodiken weiterzuentwickeln. Im Fokus steht vorrangig eine automatisierte Geometrieanpassung auf Basis von Ergebnissen direkt aus der Strömungssimulation. Hierzu werden Parameter definiert über welche die Geometrie durch Designpoints angepasst werden kann und anhand von geeigneten Qualitätskriterien bewertet wird. Zu diesem Vorgehen besteht bereits Erfahrung zur ganzheitlichen Optimierung von Wendelverteilerwerkzeugen [18] und eine Übertragung auf das Demonstratorwerkzeug erscheint sinnvoll.

Literatur

- [1] Vlachopolous, J. Romancing the Rheological Design of Extrusion Dies
Polymer Processing Society, PPS, Banff, Canada, 2010
- [2] Hopmann, C. Surface quality of profile extrusion dies manufactured
Yesildag, N. by Selective Laser Melting.
Bremen, S.
et al.
RTeJournal - Forum für Rapid Technologie, 2015
- [3] Ahuja, B. A round robin study for laser beam melting in metal
Schaub, A. powder bed
Junker, D.
et al.
South African Journal of Industrial Engineering. 27
(2) (2016).
DOI: 10.7166/27-2-1201
- [4] Krauss, H. Investigations on Manufacturability and Process
Zaeh, M. F. Reliability of Selective Laser Melting
Physics Procedia. 41 (2013), S. 815-822.
DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.153.
- [5] acatech Additive Fertigung
Stellungnahme der acatech - Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften
Nationale Akademie der Wissenschaften. München,
2017
- [6] Strano, G. Surface roughness analysis, modelling and
Hao, L. prediction in selective laser melting
Everson, R. M.
et al.
Journal of Materials Processing Technology 213(4)
(2013), S. 589-597.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
- [7] Sehrt, J. T. Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen
Herstellung metallischer Bauteile durch das
Strahlschmelzverfahren
Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2010
- [8] Danjou, S., Ermittlung optimaler Bauteilarorientierunge zur
Köhler, P. Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-
Kette
Proceedings der Rapid.Tech Erfurt

- [9] Spierings, A. B.
Herres, N.
Levy, G.
Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts
Rapid Prototyping Journal 17(3) (2011), S. 195-202.
DOI: 10.1108/13552541111124770.
- [10] Fox, J. C.
Moylan, S. P.
Lane, B. M.
Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing
Procedia CIRP 45 (2016), S. 131-134
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.347.
- [11] Reinarz, B.
Sehrt, J. T.
Witt, G.
et al.
Optimization of media feed channels in Laser Beam Melting
ASPE Spring Topical Meeting. Raleigh, NC, USA, 2014, S. 13-18.
- [12] Loeber, L.
Biamino, S.
Ackelid, U.
et al.
Comparison of selective laser and electron beam melted titanium aluminides
Proceedings of the 21st international Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011, S. 547-556.
- [13] Fischer, P.
Michels, R.
Moderne Schlauchköpfe mit Wendelverteilern
Fachtagung Blasformtechnik 2006, Süddeutsches Kunststoff-Zentrum SKZ, Würzburg, 2006
- [14] Burmann, G.
Extrusionswerkzeuge für die Schlauchextrusion – Neue Prinzipien und Konzepte zur Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen
Firmenanschrift der ETA Kunststofftechnologie GmbH,
Troisdorf, 03.02.2006
- [15] Saul, K.
Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen
Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2011
- [16] Stieglitz, H.
Ganzheitliche Betrachtung der Fließvorgänge in Breitschlitz- und Wendelverteilerwerkzeugen
Dissertation an der Universität Paderborn, 2001
- [17] Niemeier, H.
Analyse und Optimierung wandnaher Schmelzeströmungen in Extrusionswerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung
Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2006

- [18] te Heesen, O. Ganzheitlicher Ansatz zur Dimensionierung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen am Beispiel von Wendelverteilern
Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2015
- [19] Kummerow, J. Integration zeitabhängiger Materialmodelle in CFD-Simulationen von Extrusionswerkzeugen
Kunststofftechnik 15 (2019) 4, S. 289 - 313
- [20] Kleszczynski, S. Potenziale der bildgestützten Prozessanalyse zur Steigerung des technologischen Reifegrades von Laser-Strahlschmelzverfahren
Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2018
- [21] Fischer, P. Werkzeuge für Mehrschichtrohre – Auslegung von Wendelverteilern
Kunststoffe 91 (2001) 8, S. 142 - 145
- [22] Vlachopoulos, J. The SPE Guide on Extrusion Technology and Troubleshooting
Society of Plastic Engineers, 2001
- [23] Wiedmann, W. Mischer, Kneter, Granulievorrichtungen
In: Kunststoff-Maschinenführer, 4. Ausgabe, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [24] Manas-Zloczower, I. Mixing and Compounding of Polymers – Theory and Practice. 2nd Edition,
Carl Hanser Verlag München, 2009
- [25] Ch. Hopmann, R. Poprawe, M. Schön, T. Schmithüsen Bessere statische Mischer dank Simulation und additiver Fertigung, Blasformen & Extrusionswerkzeuge 5/2019, S. 5-9,
Fachverlag Möller, Velbert

Bibliography

DOI 10.3139/O999.01032020
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology 16 (2020) 3; page 81–107
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen der DFG-Forschungsprojekte WO 302/61-1 und WI 2118/11-1 „Thermo-rheologische Optimierung additiv gefertigter Extrusionswerkzeuge“ in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik an der Universität Duisburg-Essen.

Stichworte:

Extrusion, Additive Fertigung, Werkzeugauslegung, CFD, Thermo-rheologische Optimierung

Keywords:

Extrusion, additive manufacturing, die design, CFD, thermo-rheological optimization

Autor / author:

Bastian Neubrech, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt
Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski

E-Mail: bastian.neubrech@uni-due.de
Webseite: www.uni-due.de/kkm
Tel.: +49 (0)203/379-1534
Fax: +49 (0)203/379-4379

Institut für Produkt Engineering
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Jannik Werner, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com