

Erweiterte verfahrenstechnische Möglichkeiten durch generativ gefertigte Mischschlauchköpfe

Dr.-Ing. Heinz Groß

Extrusionswerkzeuge, die generativ im selektiven Laserschmelzverfahren (SLM) hergestellt wurden, sind inzwischen für unterschiedliche Anwendungen sowohl in Entwicklungslaboren als auch in der Produktion erfolgreich getestet worden. Dennoch überwiegen bei den meisten potentiellen Anwendern immer noch die Bedenken gegen die völlig ungewohnten Konstruktionen. Insbesondere Befürchtungen, dass die relativ rauen Oberflächen der Fließkanäle von Extrusionsdüsen (Werkzeugstahl Rz=30-50, Edelstahl Rz=20-42) zu Problemen führen könnten, lassen sich nur sehr schwer ausräumen.

Das hilft weder ein vom IKV veröffentlichtes Forschungsergebnis, in dem es heißt: "So konnte bei einem Laborversuch nachgewiesen werden, dass ein Farbwechsel in einem additiv gefertigten Extrusionswerkzeug um 25 Prozent schneller als beim konventionell gefertigten Werkzeug möglich ist", noch die praktische Erfahrung, dass noch keiner der aktuellen Nutzer von Extrusionswerkzeugen, die adaptiv im SLM-Verfahren hergestellt worden sind, bisher irgendwelche Probleme hatte, die ursächlich auf die rauen Oberflächen der Fließkanäle zurückzuführen waren.

Nur Entscheider, die die Vorteile und den Nutzen, den die neuartigen Konstruktionen besitzen, rein technisch bewerten können, und die zudem auch noch eine ausschließlich rationale Aufwand-Nutzen-Analyse durchführen, entschließen sich zur Zeit dazu, adaptiv hergestellte Extrusionsdüsen zu erproben. Deshalb profitieren nach wie vor nur wenige Firmen von Köpfen, die im SLM-Verfahren hergestellt worden sind. Bild 1 zeigt



Bild 1: Foto von zwei generativ hergestellten Köpfen für zwei Kunden, die entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen des jeweiligen Kunden konzipiert worden sind

beispielhaft zwei für Produktionsanlagen konzipierte Köpfe. Oben ist ein Kopf abgebildet, der einen konventionellen Flanschbund und eine normale massive Düse besitzt. Der untere Kopf besitzt dagegen einen einfachen Schraubanschluss und auf der Stirnseite eine geteilte Ringnut (siehe Bild 3) zum Einleiten der Stütz- und der Kühlluft. Dieser Kopf besitzt auch eine vorteilhafte Flexringdüse (siehe auch Bild 5), mit der nach dem optimalen Justieren verbleibende Wanddickenunterschiede verringert werden können. Der Fließkanalspalt dieser Flexringdüse, die einen Durchmesser von 50 mm besitzt, lässt sich in dem konkreten Fall mit Hilfe von 28 Stellschrauben lokal begrenzt

verstellen, um nicht symmetrische Abweichungen von der Sollwanddicke im Schlauch oder im Rohr zu minimieren und so engere Wanddickentoleranzen zu erreichen.

Nachfolgend nun eine Auflistung von unterschiedlichen Wünschen, die die Anforderungslisten für die Köpfe enthalten können. Die Liste enthält etliche Forderungen, die mit konventionell gefertigten Köpfen nur unzureichend oder auch überhaupt nicht realisierbar sind.

- Betriebspunktunabhängiges Verarbeitungsverhalten
- Keine in Extrusionsrichtung verlaufenden Bindenähte

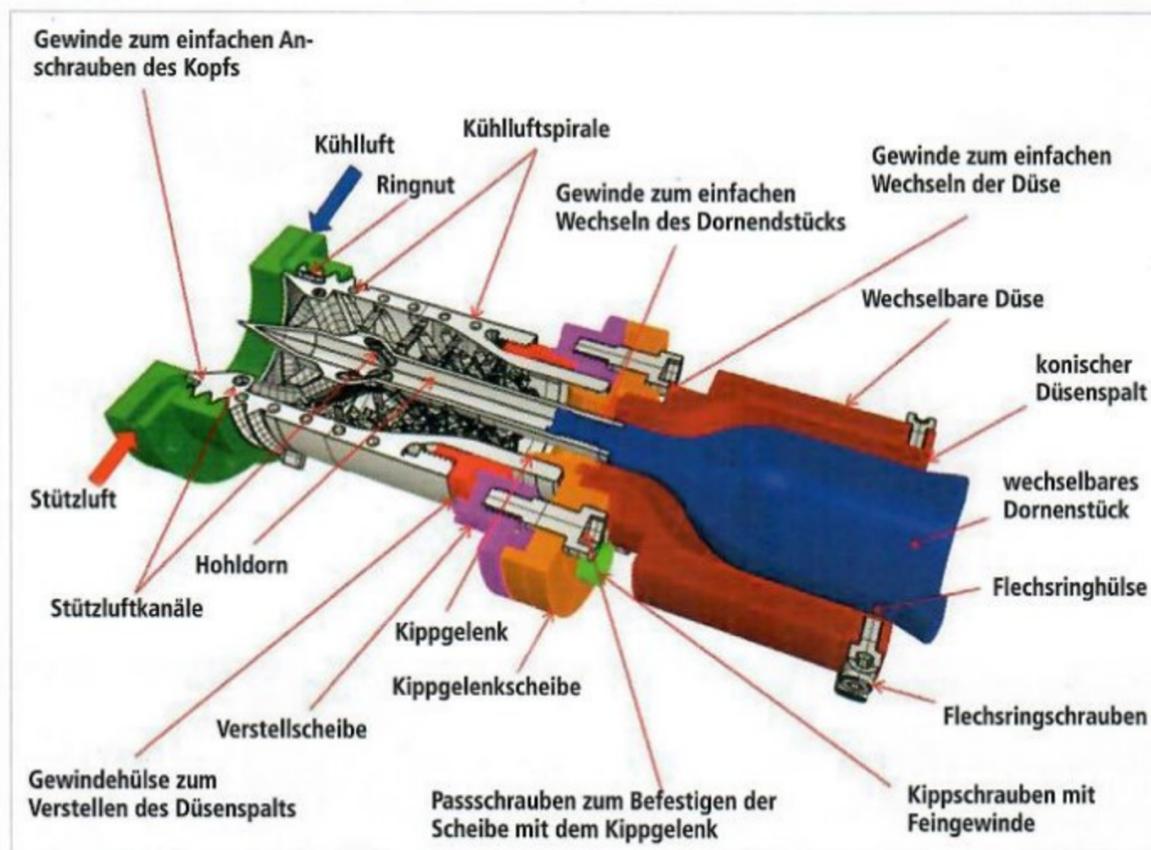


Bild 2: Halbtransparente Schnittdarstellung eines innovativen Schlauchkopfs mit einer Flexringdüse

- Erhöhung der Liniengeschwindigkeit oder Reduzierung der Anlagenlänge durch Vorkühlung der Schmelze im Kopf
- Großer Durchmesserbereich, der mit einem Kopf realisiert werden kann ($\varnothing 2$ bis $\varnothing 60$ mm)
- Keine signifikanten Druckunterschiede im Kopf über dem Umfang des Fließkanals
- Vermeiden eines thermischen Abbaus der Schmelze, die beim Abstellen der Extrusionslinie im Kopf verbleibt
- Minimierung des Reinigungs- und Wartungsaufwands
- Einfacher und schneller Wechsel des Kopfs
- Schneller Düsen- und Dornwechsel
- Schnelles Aufheizen und schnelles Abkühlen des Kopfs beim An- und Abstellen der Anlage
- Minimierung des Materialabfalls durch ein schnelles Ab- und Wiederanfahren der Extrusionslinie
- Geringe Verweilzeit der Schmelze im Kopf
- Geringer Energieeinsatz während des Betriebs
- Gutes Spülverhalten, um kurze Material- und Farbwechselzeiten zu realisieren
- Möglichkeit, den Spalt am Ende des Kopfs bei laufender Anlage optimieren zu können
- Möglichkeit zur feinfühligsten, zielgerichteten und reproduzierbaren Justierung („Zentrierung“) der Düse
- Minimierung von Schmelzeinhomogenitäten im Fließkanal

Kopfkonzzept: Um diese Wünsche erfüllen zu können, war es zwangsläufig notwendig, einige bisher unbekannte, neuartige Lösungen in die Köpfe zu integrieren. Bild 2 zeigt in einer Schnittdarstellung einen Kopf, der konsequent nach den Wünschen eines einzelnen Kunden konzipiert wurde. Er unterscheidet sich grundlegend von konventionell gefertigten Köpfen. So wiegt der für einen Schmelzedruck von bis zu 250 bar ausgelegte Kopf bei einem Düsendurchmesser von 14,3 mm (Bild 1 oben) nur 1,636 kg (Bild 3). Der Kopf mit der Flexringdüse, die einen Durchmesser von 50 mm besitzt wiegt lediglich 2,6 kg (Bild 1 unten). Trotz des geringen Gewichts und der geringen Baugröße können die Köpfe mit Düsen für einen großen Durchmesserbereich von 2 bis 60 mm betrieben werden. Die geringe Kopfmasse ist wichtig, um den Kopf schnell aufheizen zu können. Dieser kann innerhalb kürzester Zeit auf Betriebstemperatur aufgeheizt werden, wie in dem kurzen Video zu sehen ist, das dem QR Code hinterlegt ist.

Dennoch würde der Kopf beim Abkühlen speziell bei Schmelzen, die thermisch empfindlich sind, oder aber die eine Vernetzungsmittel enthalten, immer noch zu lange auf einer kritischen Temperatur verweilen. Um dieses Problem zu lösen, wurde in die Außenwand ein spiralförmig verlaufender Kühlkanal integriert. Darüber kann der Kopf beim Abfahren der Extrusionslinie mit Hilfe von Druckluft extrem schnell auf eine Temperatur abgekühlt werden, die für die jeweilige Schmelze unkritisch ist. Dadurch kann beim Abstellen des Extruders ein thermischer Abbau oder ein Vernetzen der im Kopf verbleibenden Schmelze verhindert werden. Der Kühlkanal kann auch eingesetzt werden, um die Schmelze während des Be-

Bild 4: Stirnseite des Kopfs mit der durch zwei Wände geteilten Ringnut über die sowohl die Stütz- als auch die Kühlluft vom Flansch in den Kopf überführt wird

Bild 3: Kopfgewicht gemessen mit einer Briefwaage



triebs im Kopf bereits gezielt zu kühlen, um darüber die Kühlkanallänge verkürzen oder aber die Liniengeschwindigkeit erhöhen zu können. Zur Homogenisierung der Schmelze, zur Reduzierung der Verweilzeit sowie zur Verringerung der Spülzeiten bei einem Material- oder Farbwechsel sind in den Fließkanal spiralförmig verlaufende Mischstege integriert. Mit diesen zum Patent angemeldeten Stegen ist auch gleichzeitig der Hohlhorn mit dem Gehäuse des Kopfs verbunden. Diese Stege und auch die gesamte Innenoberfläche des Kopfs sind mit einer äußerst harten (1200 HV) hydrophoben Schicht beschichtet, die das Gleiten der Schmelze an den Wandungen des Fließkanals unterstützt. Der Kopf erfordert keine Wartung. Gereinigt wird er einfach und gründlich in einem Pyrolyseofen bei Temperaturen bis maximal 450 °C.

Die Stützluft wird über Bohrungen, die im Inneren der Mischstege verlaufen, von außen in den Hohlhorn geführt. Auf diese Weise können mechanische Schwachstellen durch störende Bindenähte in den produzierten Schläuchen oder Rohren vermieden werden. Um einen schnellen Kopfwechsel zu ermöglichen, wird sowohl die Stützluft als auch die Luft, mit der die Wand des Kopfs über die vorhandene Kühlspirale gekühlt wird, über Bohrungen, die sich im Anschlussflansch befinden, zugeführt. Über eine im Kopf befindliche stirnseitige Ringnut, die in zwei separate Kammern aufgeteilt ist, gelangt sie dann in den Kopf (Bild 4). Damit kann ein Kopfwechsel vorgenommen werden, ohne dass dafür erst die Leitungen zu den Luftkanälen vom Kopf getrennt beziehungsweise wieder angeschlossen werden müssen. Der Kopf selbst besitzt ein Anschlussgewinde,

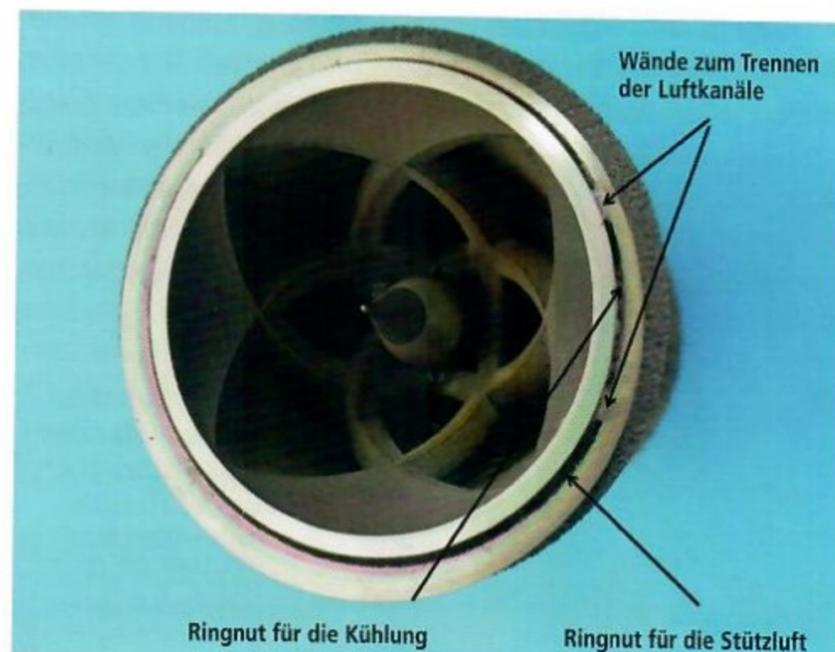


Bild 5: Seitenansicht eines Kopfs mit einer konventionellen massiven Düse und einem Flanschbund sowie einem definierten Spalt zwischen der Düse und dem Kopf zum Begrenzen des Kippwinkels

mit dem er, begünstigt durch das geringe Gewicht und die geringen Abmessungen, in einfacher Weise von Hand in die am Extruder fest angeschraubte Flanschscheibe eingeschraubt werden kann. Die Düse und das Dornendstück besitzen zur Montage an den Kopf jeweils ein Gewinde, wodurch ein einfacher und schneller Geometriewechsel bei der Schlauch- oder Rohrextrusion möglichen wird. Somit kann der Düsendurchmesser ebenfalls sehr schnell gewechselt werden, ohne dass dafür Schrauben benötigt werden.

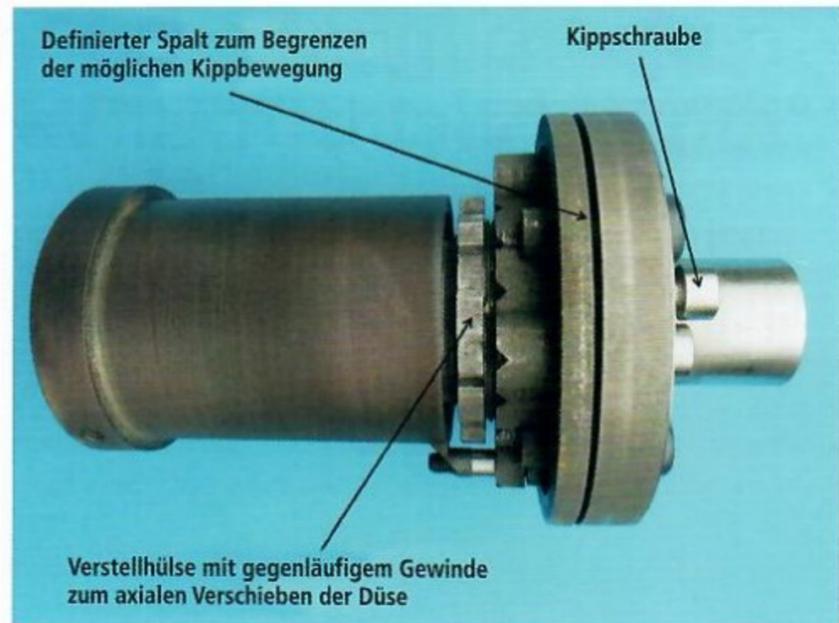


Kippgelenk zum Justieren der Düse: Bei konventionellen Köpfen ist es Stand der Technik, die Düse zum Optimieren der Wanddickenverteilung mit Hilfe von radial angeordneten „Zentrierschrauben“ senkrecht zur Extrusionsrichtung zu verschieben. Dabei entstehen zwangsläufig bereichsweise nicht erwünschte Unstetigkeitsstellen im Fließkanal. Im Gegensatz dazu besitzt der neu konzipierte Kopf ein patentiertes Kippgelenk, mit dem die Düse über axial angeordnete Kippschrauben zum Justieren relativ zur Mittelachse des Kopfs gekippt werden kann. Sowohl beim konventionellen Verschieben als auch beim Kippen der Düse wird der Fließkanalspalt am Ende der Düse auf einer Seite verringert, dafür aber auf der gegenüberliegenden Seite um das gleiche Maß vergrößert. Beim Verstellen dieser Kippdüse entstehen hingegen keine Unstetigkeitsstellen im Fließkanal, an denen die Schmelze hängen bleiben kann. Die Kippdüse kann zusätzlich auf Grund der speziellen Konstruktion immer nur exakt zentrisch montiert werden. Sie muss somit beim Neuanfahren eines Kopfs nicht mehr vorzentriert werden. Der Anlagenbediener startet damit immer exakt von einer identischen, zentrischen Düsenposition, wenn er zum Optimieren der Wanddickenverteilung die Düse justiert. Er kann dann die Düse sehr zielgerichtet relativ zum Dorn verstellen, da er über den Drehwinkel und die Gewindesteigung der Kippschraube immer genau weiß, um wie viel er den Düsenspalt gekippt bzw. verstellt hat. Er kann auch jederzeit eine Position, die vor einem Stellvorgang, mit dem nicht das gewünschte Ergebnis erzielt worden ist, genau auf die vorherige Düsenposition zurückstellen. Eine für ein spezifisches Produkt einmal gefundene optimale Düsenposition kann im Produktionsprotokoll festgehalten und bei jedem Neustart direkt wieder eingestellt werden. Damit

lässt sich der Anfahrprozess beschleunigen, der Anfall von Anfahrmaterial vermindern



Bild 6: Flexringdüse (Durchmesser 50 mm) mit 28 Stellschrauben, bei der der flexible Ring mit Hilfe der Schraube Nr. 5 lokal begrenzt verformt worden



und die Kapazität der Anlage erhöhen. Die Kippdichtung kann durch versehentliches zu starkes Kippen nicht beschädigt werden. Um das zu verhindern, ist die Kippgelenkscheibe mit Hilfe von speziellen Schulter Passschrauben an die Verstellhülse angeschraubt. Auf diese Weise wird ein definierter Spalt zwischen der Kippgelenkscheibe und der Verstellhülse erzeugt, der den mit den Kippschrauben erreichbaren Kippwinkel mechanisch begrenzt, so dass die Kippdichtung vor einer Beschädigung durch eine Fehlbedienung geschützt ist (Bild 5).

Flexringhülse zur weiteren Verringerung der Wanddickentoleranzen: Durch das radiale Verschieben der Düse können allerdings nur symmetrische Wanddickendifferenzen verringert werden. Nach dem konventionellen Justieren der Düse verbleiben in der Regel aber noch lokal begrenzte Dickenunterschiede über dem Umfang übrig, die nicht durch das konventionelle Verschieben bzw. durch ein Kippen der Düse eliminiert werden können. Diese lassen sich aber über eine lokal begrenzte Veränderung des Fließkanalspalts reduzieren. Ein über einen begrenzten Umfangsbereich vorhandenes Übermaß in der Wanddicke lässt sich bei Verwendung einer Flexringdüse bekämpfen, ohne dass die über dem restlichen Umfang vorhandene Spaltweite der Düse dabei zwangsläufig auch mit verändert werden muss. Dazu lässt sich die Flexringhülse mit Hilfe von radial über dem Umfang angeordnete Stellschrauben rein linear elastisch lokal begrenzt verformen. Darüber kann dann der Fließkanalspalt am Ende der Düse genau in dem Bereich, in dem die Wanddicke verringert werden muss, zugestellt werden. Dabei bleibt aber, im Gegensatz zum konventionellen Justieren, der restliche Fließkanalspalt in den Bereichen, in denen der produzierte Schlauch bereits die Sollwanddicke besitzt, unverändert. Auf diese Weise können Dickentoleranzen erreicht werden, die bisher nicht realisierbar waren. Da dafür in der Praxis bereits geringste lokale Zustellungen ausreichen, besitzen die Schrauben zur lokalen elastischen Deformation der Flexringhülse ein Feinstgewinde mit einer Gewindesteigung von nur 0,2 mm. Über dem Umfang der Flexringhülse sind nur deshalb sehr viele Stellschrauben (Bild 6) angeordnet, damit die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass sich möglichst genau in dem Bereich, in dem eine zu dicke Wand bekämpft werden soll, auch Stellschrauben befinden. Alle übrigen



Schrauben der Flexringdüse müssen folglich zur Verbesserung der Dickentoleranz nicht betätigt werden, wenn die Wanddicke des Schlauchs nur in einem einzigen begrenzten Bereich optimiert werden muss.

Individuell auslegbare Köpfe: In vielen Extrusionsbetrieben existiert eine relativ große Skepsis gegenüber neuen Konzepten. Man vertraut lieber auf alt bewährte Lösungen. Deshalb gibt es auch Kunden, die nach wie vor ihren konventionellen Flansch bevorzugen und dafür in Kauf nehmen, dass die Luftleitungen an die Düse angeschlossen werden müssen. Es gibt auch Kunden, die sich mit den vielen Stellschrauben einer Flexringhülse nicht anfreunden können. Auch für diese Kunden kann ein vorteilhafter generativ hergestellter Kopf maßgeschneidert werden. Der in Bild 1 oben gezeigte Kopf besitzt auf Wunsch des Kunden keine Flexringdüse und auch kein Gewinde zum Anschrauben der Düse an den Flansch. Dieser Kopf besitzt auch keine Ringnut zum Einleiten der Stütz- und der Kühlluft, sondern zwei Bohrungen über die die Luftschläuche direkt an den Kopf angeschlossen werden. Bei einem Wechsel des Kopfs müssen diese Verbindungen dann allerdings wieder gelöst werden. Unten ist dagegen ein Kopf mit einem vorteilhaften Schraubanschluss und einer auf der Stirnseite befindlichen geteilten Ringnut zum Einleiten der Stütz- und der Kühlluft zu sehen.

Stufenlose Düsenspaltverstellung bei laufender Extrusion:

Bei der Schlauch- und Rohrextrusion ist es Stand der Technik Düsen einzusetzen, die am Ende eine mehr oder minder lange Parallelzone besitzen, um das Schwellen der Schmelze beim Austritt aus der Düse zu begrenzen. Dies hat aber den Nachteil, dass es bei der Auslegung einer Düse für eine neue Schlauch- oder Rohrgeometrie schwierig ist, auf Anhieb genau den für das Produkt optimalen Düsendurchmesser und den optimalen Düsenspalt zu treffen. Verwendet man hingegen Düsen, die am Ende einen konischen Fließkanal besitzen, so wie es sich seit Jahrzehnten im Bereich des Extrusionsblasformens bewährt hat, dann kann beim Einfahren des neuen Produkts der Düsenspalt bei laufender Anlage stufenlos optimiert werden. Dafür ist es erforderlich, dass die Düse axial verschoben werden kann. Deshalb weist der Kopf eine Gewindehülse auf, die zwei gegenläufige Gewinde besitzt. Damit kann dann die in die Kippgelenkscheibe eingeschraubte Düse gegenüber dem Dorn axial verschoben werden. Beim Verschieben der Düse bleibt sowohl die mit Hilfe der Kippschrauben optimierte Düsenspaltsituation als auch die Einstellung der Flexringhülse unverändert. Bild 7 zeigt den aus der Düse herausgefahrenen konischen Dorn. Wird im Verlauf der Zeit durch eine Optimierung der Verfahrensparameter die Produktionsgeschwindigkeit erhöht, so kann auch der Austrittspalt der Düse einfach und schnell bei laufender Anlage an die neue Abzugsgeschwindigkeit angepasst werden. Größere Liniengeschwindigkeiten oder aber kürzere Anlagenlängen können mit dem entwickelten Kopf realisiert werden, indem die Schmelze mit Hilfe der in der Gehäusewand des Kopfs spiralförmig verlaufenden Kühlspirale bereits im Kopf gekühlt wird. Auch beim Blasformen können auf diese Weise die Zykluszeiten weiter reduziert werden und damit die Fertigungskosten der produzierten Hohlkörper weiter verringert und die Kapazität

Bild 7: Konischer Dorn, der zur Einstellung des maximal möglichen Düsenspalts weit aus der Düse herausgefahren wurde



der Anlage erhöht werden. Besonders vorteilhaft ist diese Lösung, wenn mit dem Kopf geschäumte Produkte hergestellt werden sollen. Köpfe, mit denen zum Schäumen eine Schmelze verarbeitet wird, die ein Treibmittel enthält, werden in aller Regel mit Öl temperiert. Dabei ist es bei einer konventionellen abtragenden Bauweise nicht so einfach, Kanäle so einzubringen, dass einerseits die Kanäle absolut dicht sind, und dass andererseits auch eine homogene Temperierung des Kopfs sichergestellt ist. Bei dem adaptiv hergestellten Kopf kann der in der Außenwand des Kopfs befindliche spiralförmig verlaufende Kanal zur gleichmäßigen Temperierung beziehungsweise auch zur Kühlung mit Öl beaufschlagt werden. Da es innerhalb des Kopfs keine Trennebenen gibt, besteht auch keine Gefahr, dass Leckagen auftreten können. Um den für den Schaumprozess optimalen Druckverlauf zu realisieren, besitzen auch Köpfe zum Schäumen einen konischen Fließkanalspalt am Ende der Düse. Zur Optimierung des Schäumprozesses bei konstantem Massedurchsatz kann der Druck im Fließkanal durch die Veränderung des Austrittspalts an der Düse stufenlos verstellt werden. Auch diese Funktion ist in jedem Kopf, der ein Kippgelenk besitzt, automatisch vorhanden. Die Verschiebefunktion und der konische Fließkanalspalt sind rein optional. Wenn ein Rohrhersteller weiterhin einen parallelen Fließkanal am Ende der Düse bevorzugt, so kann auch ein adaptiv hergestellter Kopf mit der gewünschten vertrauten Fließkanalgeometrie hergestellt werden.

Köpfe für größere Rohrdurchmesser: Prinzipiell können auch Köpfe für größere Rohrdimensionen in gleicher Weise vorteilhaft adaptiv hergestellt werden. Da allerdings die Margen in der Rohrextrusion in Deutschland inzwischen nicht besonders üppig sind, und da die Rohrhersteller in aller Regel bereits für alle zu fertigenden Rohrdimensionen Köpfe besitzen, fällt es schwer, sich dazu durchzuringen, einen vorhandenen funktionsfähigen Kopf durch einen neuen vermeintlich besseren Kopf zu ersetzen. Dies insbesondere, da die Kosten für größere Köpfe höher sind als die für kleinere Schlauchköpfe. Die Situation, dass tatsächlich ein neuer Kopf beschafft werden muss, tritt nur noch selten auf. Da hilft es wenig, dass sich das Kopfkonzzept im Bereich kleinerer Rohr- und Schlauchdurchmesser bereits bewährt hat. Es hilft ebenso wenig, dass ein adaptiver Kopf auf Grund des zur Herstellung erforderlichen minimalen Materialeinsatzes letztendlich erheblich schneller und vor allem auch kostengünstiger hergestellt werden kann.

Dr.-Ing. Heinz Groß Kunststoff-Verfahrenstechnik
Ringstr. 137, 64380 Roßdorf, Deutschland
www.gross-k.de