

Coextrusionswerkzeuge

Möglichkeiten und Grenzen bei der Herstellung von mehrschichtigen Rohren und Schläuchen

Wendelverteiler sind innerhalb der Gruppe der Extrusionswerkzeuge mit kreisringförmigem Austrittsspalt besonders geeignete Bauteile zur Umfangsverteilung von Kunststoffschmelzen. Herstellbar sind Produkte ohne Bindenähte mit sehr guter Wanddickenverteilung am Umfang. Aufgrund der guten thermischen Schmelzeshomogenität am Kreisringspalt nach der Verteilung sind bei Coextrusion sehr dünne Einzelschichtdicken (ca. 1% der Gesamtwanddicke) realisierbar (Bild 1). Historisch betrachtet hat die Blasfolienherstellung die Entwicklung verschiedener Wendelverteilerbauarten vorangetrieben. Seit Anfang der neunziger Jahre sind hier Werkzeugsysteme bekannt, bei denen die Schmelzeverteilung in einer Ebene (radial) erfolgt [1]. Während die einzelnen Werkzeugbauteile dieser Systeme (auch *Stack Die* oder *Pancake Die* genannt) gestapelt werden, sind bei den in Richtung der Extrusionsachse verteilenden Systemen die Verteilerhülsen coaxial ineinander geschachtelt. Konische Verteiler – zunächst für Blasfolienwerkzeuge entwickelt – nehmen eine Zwischenposition ein. Diese Verteiler werden (mit Wendelverteiler- oder Pinolenverteilergeometrie ausgestattet) coaxial ineinander gestapelt. Vielfältige Kombinationen dieser Umfangsverteiler sind bekannt, um Coextrusionswerkzeuge zur Herstellung vielfältige hochwertige Produkte aufzubauen.

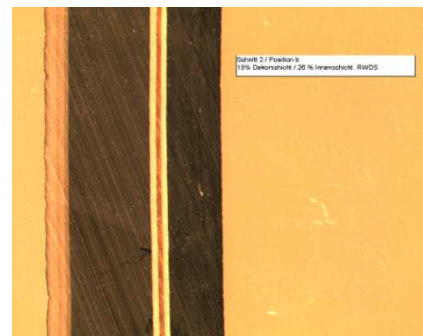


Bild 1 Schnitt durch Wandung mit Dünnschichten

Bei der Konzeption eines Coextrusionswerkzeuges für ein bestimmtes Produkt muss der gesamte heiße Teil einer Extrusionsanlage mit in die Planung einbezogen werden. Als selbstverständlich wird hier eine ideale Gestaltung der Extruderschneckenengeometrie einschließlich der passenden Homogenisierenelemente vorausgesetzt. Im Verlauf des Fließwegs der Kunststoffschmelze von der Schneckenspitze bis zum Umfangsverteiler sind hinsichtlich der idealen und verweilzeitgerechten Gestaltung der Fließkanäle „Problemzonen“ vorhanden, die beim Werkzeug- und Anlagendesign berücksichtigt werden müssen. Dies betrifft besonders mögliche Stagnation von Strömungen im Bereich von Lochplatten für Siebeinsätze, Umlenkungen in Schmelzeleitungen, aber auch die Beheizung der zumeist massiv ausgeführten Anschlussstücke und Adapter vor dem Einströmen der Schmelze in das Extrusionswerkzeug.

Prinzipielle Gestaltung von Fließkanalquerschnitten

Schmelzekanäle in Extrusionswerkzeugen müssen hinsichtlich der Kanalquerschnitte und der Kanalführung an die Möglichkeiten des Fertigungsbetriebes angepasst sein. Die Berücksichtigung der Fertigungskosten und auch Grenzen der mechanischen Werkzeugauslegung geben zu beachtende Grenzen vor.

Das Polymer ist während der Plastifizierung und Strömung durch das Extrusionswerkzeug zeit- und temperaturabhängigen Alterungsprozessen ausgesetzt [2]. Hier kommt es zunächst zu einem Abbau (Cracken) der Polymerketten. Freie Bindungen entstehen und diese können wiederum (abhängig vom Rohstoff) zu Polymerisationsreaktionen führen. Die Folge sind Änderungen der Molmassenverteilung, verknüpft mit niedrigeren oder auch höheren Schmelzeviskositäten, mitunter auch mit Vernetzungserscheinungen und Ablagerungsbildungen. Die benannten

Reaktionen finden bei Verarbeitungstemperatur innerhalb des Extrusionssystems (Extruder - Anschlussadapter - Extrusionswerkzeug) statt. Für die Gestaltung der Fließkanäle können somit folgende Regelsätze gebildet werden:

- möglichst kurze Fließwege realisieren,
- abhängig von Druckgrenzen maximale Geschwindigkeiten nicht überschreiten,
- zu hohe Geschwindigkeiten vermeiden
(lokal auftretende Beschleunigungen führen zu lokalen Temperaturspitzen),
- minimale Grenzgeschwindigkeit nicht unterschreiten.

Daraus ergibt sich die zusammenfassende Anforderung, Polymere nach dem Aufschmelzprozess auf niedrigem Temperaturniveau schnellstmöglich in eine entsprechende Produktform zu bringen.

Die Dimensionierung von Schmelzekanälen, Verzweigungen und Umlenkungen muss hinsichtlich Verweilzeit und möglicher Stagnationen beurteilt werden. Aufgrund des vorliegenden parabolischen Geschwindigkeitsprofils einer laminaren Kunststoffströmung mit wandhaftender Schmelze ergeben sich in Extrusionssystemen charakteristische Verweilzeitverteilungen mit sogenannten Verweilzeitschwänzen. Neben den prozesstechnischen Parametern wie Masse-durchsatz und Temperatureinstellung wird die Verweilzeit einer Extrusionsgeometrie wesentlich durch die Gestaltung der Fließkanalquerschnitte beeinflusst.

Dazu wurden 3 verschiedene Geometrien (Bild 2) bei gleichen Querschnittsflächen und gleichen Prozessdaten betrachtet. Signifikant ist die Auswirkung von Ecken in einem Fließkanal. Hier ist die Verweilzeit auf einem 300 mm langen Fließpfad, der sich im betrachteten Fall 0,05 mm von der Kanalwand entfernt befindet im „Eck der Wappengeometrie“ je nach Material um den Faktor 10 höher. Auf längeren Fließwegen wird dieser Effekt noch viel stärker ausgeprägt. Damit kann als Regel definiert werden: **In modernen Extrusionswerkzeugen müssen „Ecken, Kanten und Stagnationszonen vermieden werden.** Es ist bekannt, dass besonders die Fertigungsqualität und hier speziell die Oberflächenrauheit der Fließkanalwände das Verweilzeitverhalten entscheidend beeinflussen.

Nicht nur die Betrachtung der Verweilzeit hinsichtlich der Kosteneffizienz bei Material - Wechselvorgängen steht im Focus der Betrachtungen. Neuere Untersuchungen zeigen, dass auch Verweilzeiten und damit verbundene lokale Änderungen von Schmelzeigenschaften Einfluss auf die Produktqualität haben können. Auf diese Effekte wird bei Diskussion der Umfangsverteilung später noch eingegangen.

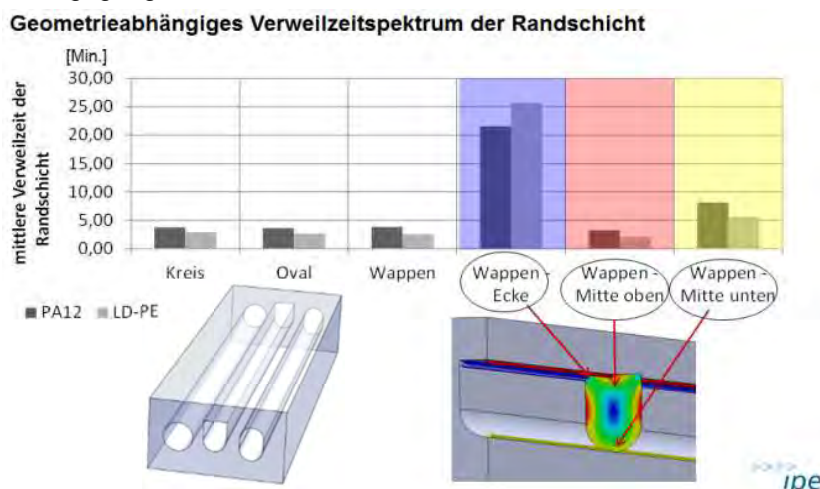


Bild 2 Geometrieabhängige Verweilzeiten in der 0,05 mm Randschicht

Vorverteilung der Schmelze - Primärverteiler

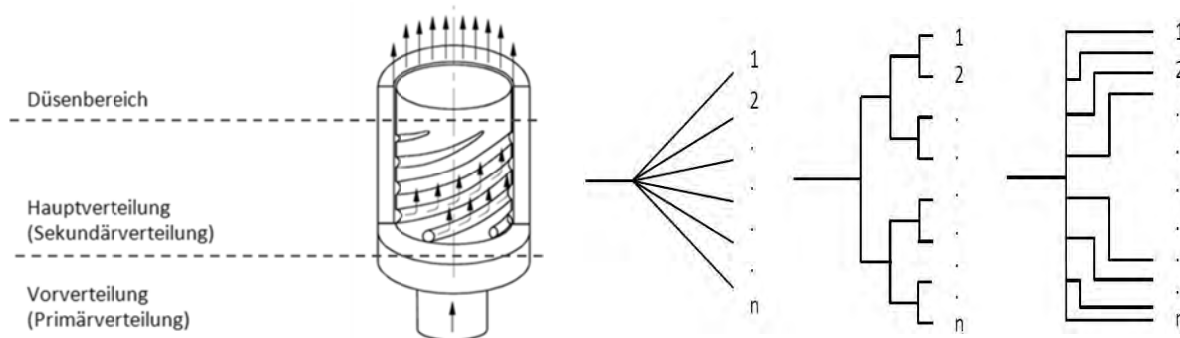


Bild 3 Geometriebereiche bei Wendelverteilern Bild 4 Prinzip verschiedener Vorverteilensysteme [3]

Nach der Einspeisung der Schmelze in das Extrusionswerkzeug erfolgt die Verteilung der Schmelzen am Umfang. Hier wird unterschieden zwischen Primär- und Sekundärverteilung (Bild 3). Die Primärverteilung eröffnet bei Wendelverteiler- und Pinolenwerkzeugen eine Möglichkeit Medien und Schmelzeströme zu kreuzen und damit komplexe Coextrusionswerkzeuge aufzubauen. Bei der Gestaltung eines Primärverteilensystems müssen zusätzlich zu den vorstehenden prinzipiellen Gestaltungsrichtlinien (Regelsätzen) folgende Aspekte berücksichtigt werden [3]:

- Fertigungsmöglichkeiten und -kosten
- Fließwiderstände
- Art der Schmelzeaufteilung
- Platzbedarf, Montierbarkeit nachfolgender Komponenten
- Druckverluste, Druckbelastung von Flächen, mechanische Festigkeiten
- Thermische (gegenseitige) Beeinflussung der Schmelzeströme
- Durchführbarkeit von Sekundärmedien (Stützluft, Kühlluft, etc.)

Einen gewissen Freiheitsgrad bietet die Wahl verschiedener Vorverteiler-Konfigurationen um die Schmelze von der Einspeisung in das Werkzeug zum umfangsverteilenden Bauteil zu führen. Besonders bei Coextrusionswerkzeugen mit coaxialen Wendelverteilerhülsen haben sich verschiedene Bauvarianten etabliert: Sternverteiler, 2^n -Vorverteiler und Breitschlitzvorverteiler [4]. Coextrusionswerkzeuge mit Radialwendelverteilern nutzen 2^n Verteiler und längenbalancierte Systeme (siehe Bild 4). Die Auswahl des geeigneten Vorverteilerprinzips ist stark abhängig von den eingesetzten Rohstoffen, den Prozessdaten der jeweiligen Schicht und den Anforderungen an das Produkt. Hier muss berücksichtigt werden, dass eine strömende Kunststoffschmelze in Form eines parabolischen Geschwindigkeitsprofils vorliegt. Im Querschnitt des Fließkanals stellt sich ein Temperatur- und Schergeschwindigkeits-abhängiges Viskositätsprofil ein, welches im Rahmen der üblichen isothermen Auslegungsrechnung nicht detailliert betrachtet wird. Gerade die Schmelztemperatur und auch zeitabhängige Änderungen der Schmelzeigenschaften können die Umfangsverteilung eines anschließenden Wendelverteilers beeinflussen. Eine symmetrische Aufteilung der Schmelzeströme und damit eine für jede Wendel repräsentativ gleiche Einspeisung mit "statistisch gleicher Schmelzgeschichte" sollte das Ziel der Gestaltung von Vorverteilensystemen sein. Je nach Anwendung kann oder muss hier von der Zielgestaltung abgewichen werden. Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft wie unterschiedlich die Gestaltung der Kanalführung erfolgen kann.

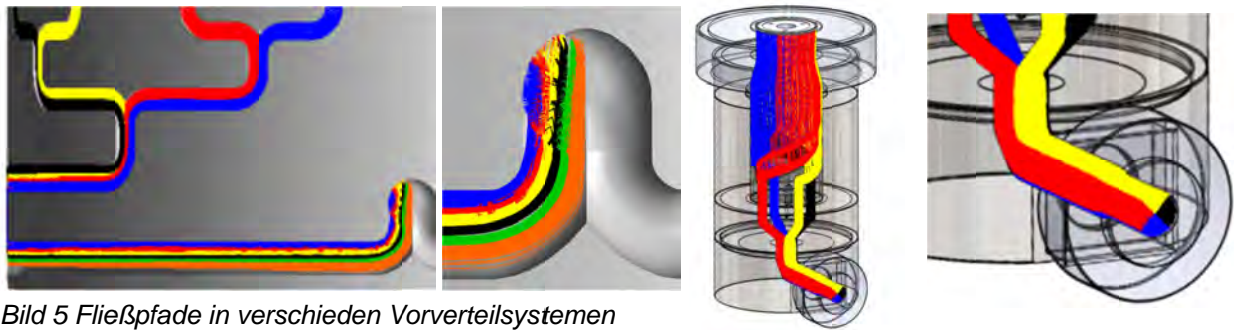


Bild 5 Fließpfade in verschiedenen Vorverteilsystemen

Umfangsverteilung - Wendelverteiler Auslegung mit CFD-Methoden

Der Wendelverteiler ist das eigentliche kennzeichnende Element zur Erzielung einer sehr guten Umfangsverteilung. Es stellt sich die Frage: Welche Geometrie ist die Idealgeometrie? Eine klare Antwort ist nicht möglich. In allen Fällen ist die Auslegung ein Kompromiss. Zu verschiedenartig sind die anwendungsspezifischen Anforderungen, denen die Wendelgeometrie gerecht werden muss.

Bild 6 zeigt die bekannte Umfangsstruktur eines mittels Wendelverteiler hergestellten Produktes. Die aus jeweils einer Wendelnut stammenden sichelförmig am Umfang verteilten Schmelzeanteile beinhalten für den Fall einer symmetrischen Primärverteilung jeweils das gesamte Verweilzeitspektrum der Schmelze und auch jeweils im Detail verschiedene Temperaturprofile im Eingang der Wendelkanalbohrung. Nach erfolgter Umfangsverteilung gilt aber auch für jeden betrachteten Sektor: hier ist eine repräsentativ gleiche Verteilung innerhalb eines Wanddickensegmentes vorhanden.

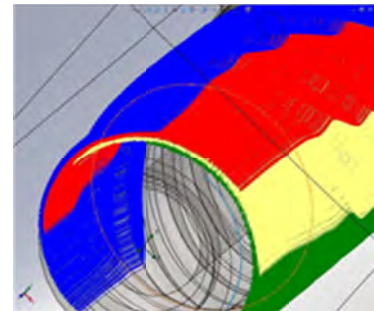


Bild 6 Ausbildung der Sichelstruktur bei Wendelverteiler-systemen

Die rheologische Auslegung des Sekundärverteilers erfolgt üblicherweise basierend auf analytischen Gleichungen und mit Hilfe der Netzwerktheorie. Abgeschlossen wird der Auslegungsprozess durch eine Strömungsanalyse mit CFD Methoden. Die Bild 7 zeigt exemplarisch die CFD – Auslegung eines ETA-Circularverteilers. Unter Nutzung dieser Auslegungswerkzeuge ist es in den vergangenen Jahren gelungen die Auslegung weiter zu verfeinern. Die typische Struktur der „Doppelsichel“ im Produkt (Bild 9) kann gut berechnet werden. Auf Basis der numerischen CFD - Simulation werden neben physikalischen Werten wie Druck-, Geschwindigkeits- oder Temperaturverteilung im Werkzeug auch Strömungslinien der einzelnen Speisekanäle und damit die Überlappungsbereiche der Wendeln dargestellt. Darüber hinaus lässt sich die Betriebspunktabhängigkeit eines Werkzeuges für verschiedene Durchsätze und Rohstoffe sehr gut beurteilen.

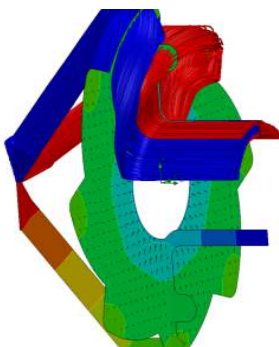


Bild 7 CFD Simulation eines Circularverteilers



Bild 8 ETA-Circularverteiler



Bild 9 Typische Wandstruktur Ausbildung der "Doppelsichel"

Das Ziel moderne Werkzeuge zumindest nicht kostenintensiver (teurer) zu gestalten, macht es erforderlich, das bestmögliche Produkt mit geringstem möglichem Aufwand zu fertigen. Durch die Anwendung von CFD - zunehmend das tägliche Arbeitswerkzeug - erhält der Konstrukteur wichtige Detailinformationen, die bei der Gestaltung von Fließkanälen und der damit verknüpften mechanischen Auslegung des Werkzeugs hilfreich sind. Die immer noch rasante Entwicklung im Bereich der Speichergrößen und Rechengeschwindigkeiten erweitert das Feld der Anwender stetig, allerdings werden die Leistungssteigerungen gerne für die Berechnung komplexerer Systeme und weiterer Detailoptimierung genutzt, wodurch letztendlich die Rechenzeit nicht reduziert wird. Aktuelle Rechenzeiten liegen bei durchschnittlich 10h auf einer modern ausgestatteten 64Bit-Multicore-Workstation.

Es ist zu beachten, dass eine auf Erfahrungen basierende Bewertung der mit CFD gewonnenen Resultate erforderlich ist. „Nur CFD“ ist keine Gewähr für eine erfolgreiche Auslegung. Nicht alle Effekte und Phänomene (z. B. Schmelzeelastizität oder Wandgleiten) werden berücksichtigt. Wichtig ist es zu beachten, dass das analysierte 3D CAD Modell nicht der real gefertigten Geometrie (mit Oberflächenrauheit und Fertigungstoleranzen) entspricht. Neben der möglichst gleichmäßigen Umfangsverteilung der Schmelzen treten zunehmend Verweilzeiten einzelner Schmelzeströme und deren Einfluss auf die Produktqualität in den Focus der Betrachtungen. Materialeigenschaften der verarbeiteten Polymere können sich temperatur- und zeitabhängig lokal verändern [2] und damit kann wiederum ein Einfluss auf die Produktqualität und den Gesamtprozess gegeben sein.

Zu diesem Themengebiet wurden Untersuchungen bei Blasfolienwerkzeugen durchgeführt, die analog auch auf Rohr- Wendelverteilerwerkzeuge übertragen werden können. Grundlage dazu sind mit CFD ausgelegte und in der Praxis nachgewiesene Masseverteilungen, die jedoch im aufgeblasenen, verstreckten Produkt „Blasfolie“ Einflüsse aus der Verweilzeit (im Dehnverhalten) erkennen lassen. Die in (Bild 10) dargestellte ideal berechnete Umfangsverteilung eines Wendelverteilers wurde im anschließenden Extrusionsversuch hinsichtlich der Umfangsverteilung untersucht und ein charakteristisches Profil (siehe Bild 11) gefunden.

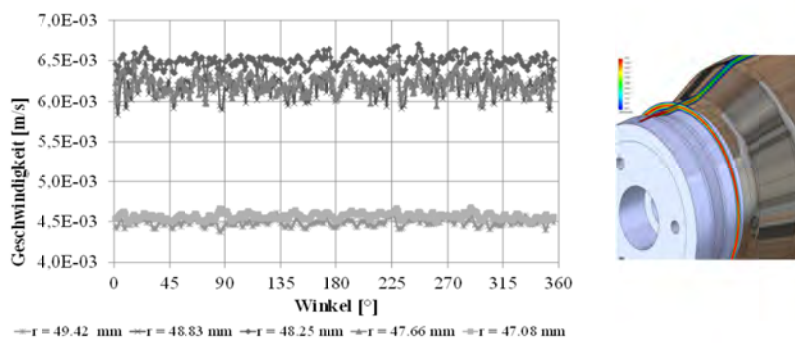


Bild 10 Ideal berechnete Umfangsverteilung

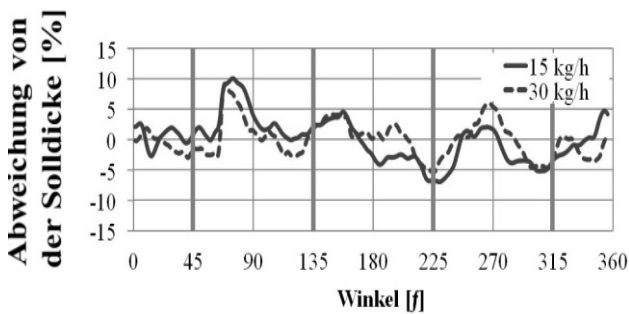


Bild 11 reale Umfangsverteilung

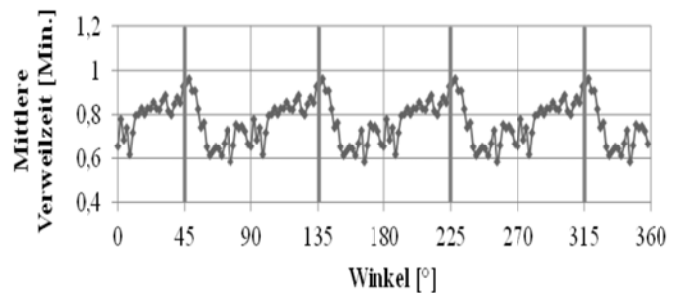


Bild 12 Verweilzeitverteilung am Austrittsspalt

Bei Auswertung – mittels CFD Analyse zu Verweilzeiten verschiedener Fließwege – des gesamten Systems - Einspeisung, Primär- und Sekundärverteiler - wurde eine Korrelation zwischen der Umfangsverteilung und der Verweilzeitverteilung (siehe Bild 12) gefunden. Bei Untersuchungen des Rohstoffs konnte eine verweilzeitbedingte Steigerung der Viskosität um 12% und eine Steigerung des Speichermoduls um 13% nachgewiesen werden. Es ist basierend auf diesen Ergebnissen aus der Blasfolienherstellung davon auszugehen, dass solche verweilzeitabhängigen Effekte einen Einfluss auf Umfangsverteilungen bei der Rohrherstellung haben. Bei kürzeren Wendellängen treten die Effekte stärker heraus, weil die mehrfach überlappende und ausgleichende Umfangsverteilung reduziert wird. Fazit aus diesen aktuell laufenden Studien ist, dass Verweilzeitverteilungen zukünftig mit in die Betrachtungen zur Auslegung einbezogen werden müssen. Hier können zunächst folgende Regeln abgeleitet werden:

- Fließkanäle sind so zu gestalten, dass „Verweilzeitschwänze“ reduziert werden.
- Stagnationszonen müssen vermieden werden!

Die Suche nach der Idealgeometrie

Zur Gestaltung eines Wendelverteilers können viele Geometrieparameter variiert werden. Ziel jeder Auslegung bzw. Variation ist es eine zum Anwendungsfall passende Leckstromkurve zu erzielen. Grundlegend können dazu folgende Regeln abgeleitet werden [3]:

- Eine hohe Wendelanzahl führt zu einer gleichmäßigen Leckstromkurve und zu guten Umfangsverteilungen.
- Eine hohe Wendelanzahl verbessert die Verteilwirkung und verringert den Druckverlust des Werkzeuges (bei gleichbleibendem Wendelquerschnitt und Wendellänge).
- Eine hohe Wendelanzahl mit hoher Überlappungsanzahl kann aufgrund niedriger Schergeschwindigkeiten ein schlechtes Verweilzeitverhalten hervorrufen.
- Eine Erhöhung der Kanalauftiefe führt zu einer gleichmäßigeren Verteilwirkung und einer Verringerung des Druckverlustes, kann aber negativen Einfluss auf das Verweilzeitverhalten haben.
- Geringe Steigungswinkel verbessern die Schmelzeverteilung, verursachen aber einen höheren Druckverlust und erfordern größere Wendellängen mit entsprechend langen Verweilzeiten
- Die Anfangsspaltweite hat einen Einfluss auf die Verteilwirkung, dieser Einfluss wird aber durch den Spaltweitenverlauf dominiert. Geringe Anfangsspalte führen zu erhöhtem Druckverlust.
- Der Spaltweitenverlauf und der Wendeltiefenverlauf haben einen starken Einfluss auf die Qualität der Verteilung des Extrusionswerkzeuges. Mit angepassten Spalt- und Tiefenverläufen kann ein Optimum in der Umfangsverteilung angestrebt werden.
- Ein möglichst betriebspunktunabhängiger Verteiler ergibt sich bei möglichst gleichen Schergeschwindigkeiten im gesamten Verteilersystem.
- Die vorstehenden Regeln gelten in gleicher Weise für radial als auch axial verteilende Wendelsysteme. Bei den Radialverteilern ist zusätzlich zu beachten:
- Eine hohe Wendelanzahl mit hoher Überlappungsanzahl führt zu großen Verteilerflächen und damit zu hohen Druckkräften, die bei der mechanischen Auslegung berücksichtigt werden müssen.
- Der Durchmesser des Radialverteilers bestimmt wesentlich die Fläche für die Radialverteilung. Große Durchmesser führen zu großen Druckkräften.

Bindenähte und Grenzflächen

Dornhalterwerkzeuge, Siebkorbwerkzeuge und Extrusionswerkzeuge mit Pinolenverteilern weisen senkrecht zur Rohrwandung verlaufende Binde- oder Schweißnähte auf. Unsicherheiten bei Produkten, die mit solchen Geometrien hergestellt werden führen zu Forderungen [5] auch einschichtige Produkte mittels aufwendigem Coextrusionsverfahren und damit ohne durchgehende Bindenaht herzustellen. Wendelverteiler führen die Strömung so, dass keine Bindenähte entstehen. Hier ergeben sich sichelförmige Fließstrukturen innerhalb der Rohrwandung bzw. innerhalb der Einzelschicht (siehe Bild 6 und Bild 9). Diese charakteristischen Spiralstrukturen die durch Farbwechselversuche gut sichtbar gemacht werden können [6], wird durch Schmelze ausgebildet, die im wesentlichen aus dem Kern der Strömung in die Spaltströmung einfließt und letztlich die aus dem Ende der entsprechenden Wendeln stammenden (je nach Produkt und Rohstoff sichtbaren) sogenannten Wendelstreifen am Innendurchmesser ausbildet. Die Grenzflächen zwischen den Spiralen liegen im Gegensatz zu den Bindenähten in Umfangsrichtung.

Ein Fazit aus der Betrachtung zu Verweilzeit, Materialwechselverhalten und deren Einflüssen ist logischerweise die Verkürzung der Wendellängen. Damit nimmt die Bedeutung der rheologischen und möglichst betriebspunktunabhängigen Auslegung mit dem Ziel einer gleichmäßigen Umfangsverteilung zu. Bei kürzeren Wendeln nimmt außerdem die Länge der Grenzlinie zwischen zwei benachbarten Wendeln ab.

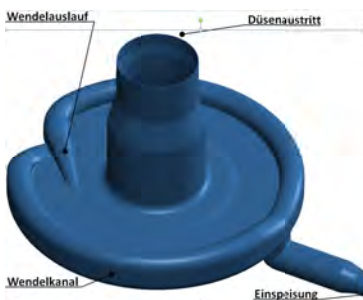


Bild 13 Volumenmodell für neuartige Umfangsverteilung

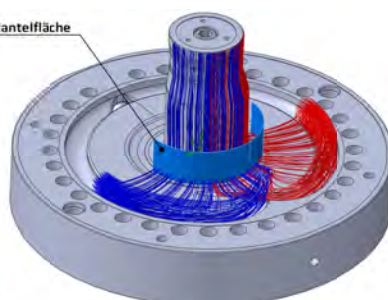


Bild 14 Auslegung der Überlappung mittels CFD



Bild 15 Ergebnis Grenzlinie über einen Bereich von 15° des Umfangs

Untersuchungen an einem Blasfolienwerkzeug haben gezeigt, dass selbst kurze Grenzlinien den Aufblasprozess im Verstreckungsbereich der Folie nicht negativ beeinflusst haben [7]. Eine Reduzierung der Grenzlinienlängen und damit der Wendellängen ist aus produkt- und prozesstechnischer Sicht möglich. Moderne Wendelverteiler können entsprechend angepasst werden.

Bauprinzipien Radialverteiler - Axialverteiler

In der Rohrcoextrusion haben Werkzeugsysteme mit kurzen Wendelnuten aufgebaut nach dem „Stack Die Prinzip“ verstärkt Einzug gehalten. Dennoch sind die herkömmlich co-axial aufgebauten Systeme je nach Anwendung immer noch sinnvoll. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Systeme werden in der nachfolgenden Tabelle 1 gegenübergestellt.

Die Grenze zwischen den beiden Bauprinzipien wird durch Massedurchsätze und die Produktdimensionen bestimmt. Zusätzliche Anforderungen aus der Coextrusion, Verarbeitbarkeit eines großen Materialspektrums mit verschiedenen rheologischen Eigenschaften und besondere spezielle Schichtstrukturen erfordern zuweilen den Einsatz der Axial-Wendelverteiltertechnik - auch bei Produktdimensionen im Arbeitsbereich der Radialsysteme:

Tabelle 1 Vergleich Axialwendelverteiler und Circular- bzw. Radialverteiler [7]

Wendelverteiler axial	
Vorteile	Nachteile
sichelförmige Bindenähte, die keine Schwachstelle im Produkt darstellen gute Umfangsverteilung geringe Betriebspunktabhängigkeit sehr gut geeignet für Coextrusion dünne Einzelschichtdicken mit guten Verteilungen gute thermische Trennung	unterschiedliche Aufenthaltszeiten der Materialströme Materialwechsel nicht ideal viele Speisebohrungen erforderlich höhere Druckverluste aufwändige Fertigung
Wendelverteiler radial	
Vorteile	Nachteile
sichelförmige Bindenähte, die keine Schwachstelle im Produkt darstellen gute Umfangsverteilung geringe Betriebspunktabhängigkeit sehr gut geeignet für Coextrusion; modularer Aufbau möglich gute thermische Trennung / modulare Beheizung wenige Einspeisungen für gute Umfangsverteilung kompakte Bauform moderate Druckverluste bei sehr guten Materialwechselzeiten kostengünstige Fertigung	druckbelastete Flächen für hohe Durchsätze ungeeignet

Coextrudierte Schläuche und Rohre Durchmesser 1 mm bis 1000 mm

Radial- bzw. Circularverteilersysteme werden speziell für mehrschichtige Medizintechnikprodukte mit Durchmessern von 0,5 mm bis ca. 10 mm eingesetzt. Die Werkzeuge, erfordern hinsichtlich der Reinigungs- und Desinfektionsanforderungen gute Montier- und Bedienbarkeit, kurze (weilige) Schmelzkanalbohrungen, frei zugängliche Verteilerkanäle (Bilder 17) und hochglanzpolierte Fließkanaloberflächen. Modular aufgebaute Baukastensysteme bieten hier Vorteile. Bei dem hier gezeigten Beispiel Bild 16 sind ohne zusätzliche Bauteile 3 verschiedene Konfigurationen "dünn-dick-dünn" / "dick-dünn-dünn" / "dünn-dünn-dick" aufbaubar. Durch den Einsatz von Streifenmodulen sind mit solchen Grundwerkzeugen und Zusatzteilen Produkte mit innenliegenden Kontraststreifen herstellbar.

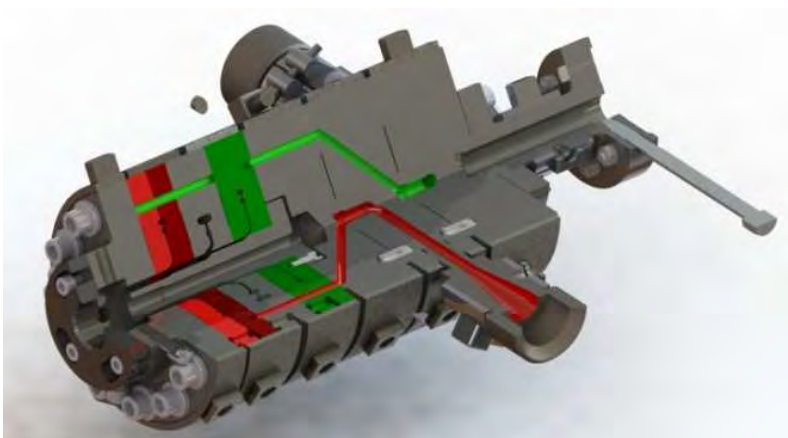


Bild 16 Dreischicht Coextrusionswerkzeug für Medizintechnik



Bilder 17 verschiedene Circularverteiler

Das Bauprinzip der Medizintechnik-Coextrusionswerkzeuge findet auch im Marktbereich der Kleinrohre (Schläuche und Rohre im Durchmesserbereich von 4 mm bis ca. 32 mm) Anwendung. Systeme mit bis zu 7 Schichten, geeignet für Massedurchsätze von bis zu 500 kg/h werden auf dem Markt angeboten.

Aufgrund der Extrusionsgeschwindigkeiten, die bei Herstellung von Kleinrohren erreicht werden (PA Rohre und Schläuche bei 80 m/min / Microduct Rohre für Telekommunikationsanwendungen bei 150 m/min) sind häufige Produktwechsel marktüblich. Die dimensionsabhängigen Bauteile der Düseneinheit müssen dementsprechend häufig getauscht werden. Entsprechend gestaltete Aufnahmevorrichtungen und Zentriersysteme sind im Einsatz um den Anforderungen hinsichtlich SMEDⁱ gerecht zu werden.

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen im Weltmarkt für Leitungssysteme für Automobil-Anwendungen z.B. für verschiedene Kraftstofftypen werden in Verbunden mit Polyamid technische Kunststoffe eingesetzt die Anforderungen wie Warmformbeständigkeit, Korrosion durch säurehaltige Kraftstoffe und elektrisch leitfähigen Innenschichten gerecht werden [7]. Die Produktvielfalt, die in diesem Marktsektor üblich ist, erfordert eine speziell anpassbare flexible Werkzeugkonfiguration. Mittels verschiedener Ausbaupvarianten ist mit einem Werkzeugsystem eine große Produktpalette herstellbar. Dazu kommen Anforderungen mit einem Werkzeug bzw. einem Werkzeugsystem sowohl Glatthohr als auch Wellrohre herstellen zu können. Zur Einstellung der Produktzentrität bei der Herstellung von Wellrohren verfügen solche Coextrusionswerkzeuge herstellerabhängig über Einrichtungen zur Zentrierung der Innendorne. Auch die Eignung für die Ummantelung rohr- und stabförmiger Produkte fließt mit in das komplexe Anforderungsprofil mit ein.

Besondere Bedeutung erhält bei dieser Produktgruppe die Temperaturführung innerhalb der Extrusionswerkzeuge. Durch die Kombination von verschiedenen Polymeren mit verschiedenen Schmelz- und Massetemperaturen sind Temperaturdifferenzen von bis zu 60°C zwischen den einzelnen Schichten keine Seltenheit. Die im "Stack-Die" oder "Pancake-Die" Prinzip aufgebauten Werkzeuge ermöglichen eine thermische Kontrolle der Einzelschichten. Dazu werden zwischen die einzelnen Verteilerscheiben Isolationsspalte eingebracht. Die thermische Kontrolle erfolgt mittels Keramik Kühlrippen und Luftgebläsen von außen. Die systembedingte sequentielle Zusammenführung der Schmelzen erweist sich bei allen marktüblichen Produkten als eine - hinsichtlich von Fließinstabilitäten - sichere Ausführung, weil die thermische Kontrolle der Innenschicht durch eine Beheizung der zentralen Pinole als auch eine angepasste Temperaturführung der Außenschichten sehr gut möglich ist. Das Bauprinzip ist als Baukastensystem auch dafür geeignet nur einzelne Schichten zur Verarbeitung von Fluorpolymeren in korrosionsgeschützter Ausführung zu gestalten. Die nachträgliche Ausrüstung des Werkzeugsystems mit zusätzlichen Optionen wie Ummantelung, Ausführung für Wellrohre ist in allen Ausbaustufen möglich. Das nebenstehende Bild 18 zeigt ein 5-Schicht Coextrusionswerkzeug mit vorstehend beschriebenen Ausbaustufen. Der massiv gestaltete Basisrahmen ist dabei der zentrale Fixpunkt der Anlage bei der Herstellung von Wellrohren.

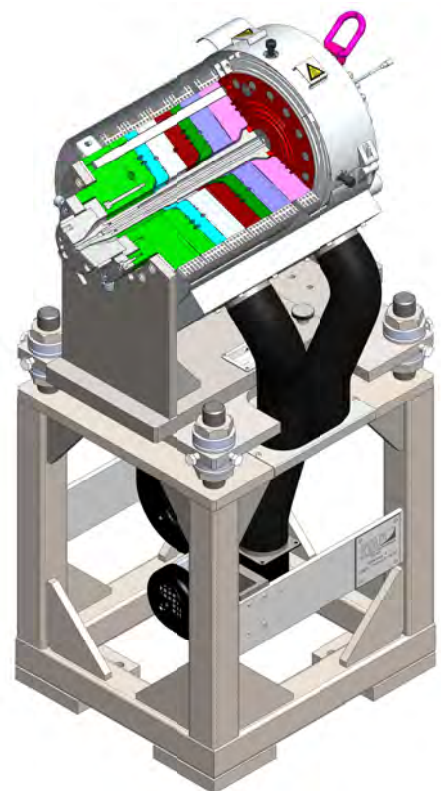


Bild 18 Fünf-Schicht Coextrusionswerkzeug zur Herstellung von Well- und Glatthohren für Automotive Anwendungen

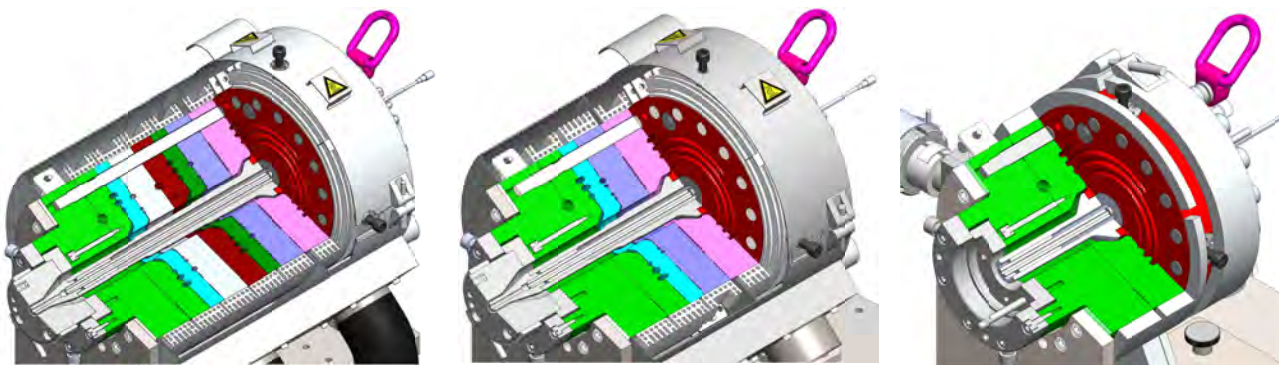


Bild 19 Coextrusions-Werkzeugsystem für Polyamidverbunde
 Ausbaustufen 5-Schicht; 3-Schicht und Mono, identische Teile gleichfarbig markiert bzw. schattiert.

Sonderbauformen für Durchmesser 32 mm bis 500 mm

Für die Herstellung einschichtiger Produkte gibt es Bauarten, deren Wendelgeometrie nicht einer Spiralgeometrie folgt, und zusätzlich die Schmelze von der Extrusionsachse zentral nach außen verteilt wird [8]. Dieses Prinzip findet als Sonderbauform vornehmlich bei Mono-Werkzeugen Anwendung. Hier ist mittels kurz bauender zentraler Sternverteilung und eines Radialverteilers (ETA-Bezeichnung: Circular-Verteiler-Invers) ein sehr kurzer Schmelzeweg vom Extruder zum Werkzeugaustritt realisierbar (Bild 20).



Bild 20 Ansicht ETA - Cirkularverteiler - CVI

Coextrudierte Rohre für Durchmesser 60 mm bis 500 mm Integrierte Werkzeugtemperierung

Beginnend mit Produktdimensionen größer 60 mm werden üblicherweise Coextrusionswerkzeuge basierend auf der coaxialen Wendelverteilterchnik gebaut. Die Übertragbarkeit des Baukastenprinzips basierend auf dem Circular- bzw. Radialverteiler ist zwar auch für größere Baugrößen möglich, allerdings werden Grenzen durch die Werkzeugmechanik (druckbelastete Flächen und entsprechend gestaltete Schraubverbindungen) sowie die Kosten (Preis wächst im Durchmesser exponentiell) überschritten.

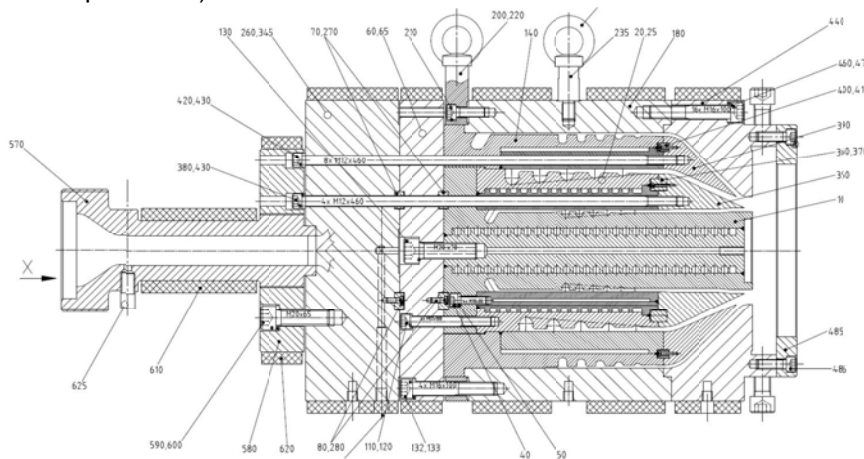


Bild 21 ETA Coextrusionswerkzeug mit 2-fach Temperierung und integrierter Isolierung

Die thermische Kontrolle der Schmelzen ist nicht erst in den vergangenen 10 Jahren mit der Entwicklung neuer Verbunde für Benzinleitungen ein Thema. Für die Herstellung von Halbzeugen für technische Produkte sind spezielle Coextrusionswerkzeuge (Bild 21) mit integrierten Temperiervorrichtungen im Einsatz. Ziel ist es hier ideale Verarbeitungstemperaturen bis zur Zusammenführung der Schmelzen einzuhalten.

Ähnlich gebaute Temperiervorrichtungen können eingesetzt werden, um innerhalb der Werkzeuge Schmelze-Randschichten massiv zu beeinflussen. Eine konsequente Fortsetzung dieser (schon alten) Technologie ist der Transfer des Kühlprinzips in Werkzeuge zur Herstellung dickwandiger Rohre. Hier ist es Ziel Schmelzetemperaturen in einem Coextrusionssystem zu beeinflussen, ohne die das Temperaturprofil der Schmelze in einem Wendelverteiler beeinträchtigt wird und damit - eben nicht - über lokale Beeinflussung der Viskosität die Verteilung zu beeinflussen (Bild 22). Die Temperierung setzt bei diesem Prinzip an der bereits fertig ausgebildeten Spaltströmung zwischen 2 Wendelverteilern an. Über entsprechend gestaltete Kühlstrecken ist ein massiver Einfluss auf die Kernströmung der zusammengeführten Coextrusionsströmungen gegeben. Die noch heißeren Randschichten werden innerhalb der Kühlung "vom Kern" aus abgekühlt. Die höhere Viskosität der Kernschicht wirkt sich stabilisierend bei der Herstellung von dickwandigen Rohren (Bild 23) als "Anti-Sagging"-Effekt aus.

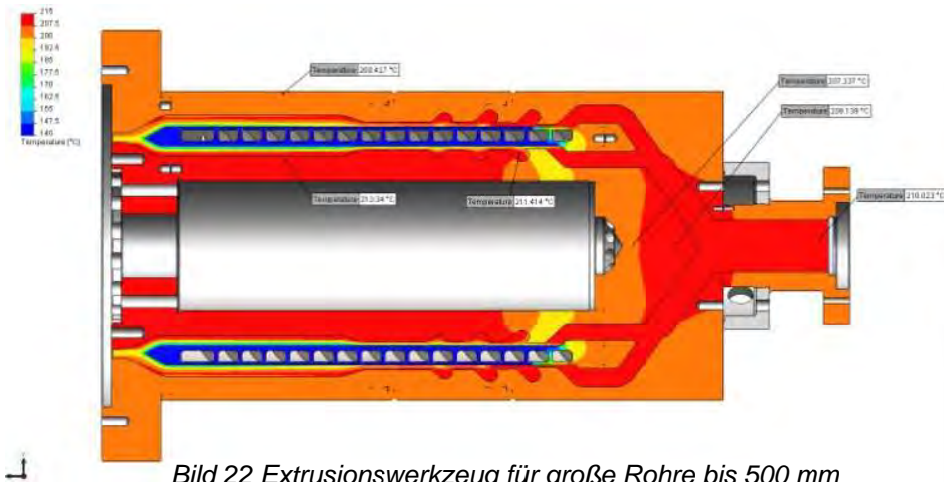


Bild 22 Extrusionswerkzeug für große Rohre bis 500 mm

Entwicklung im Förderprogramm CheK.NRW

Ziel.NRW
Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

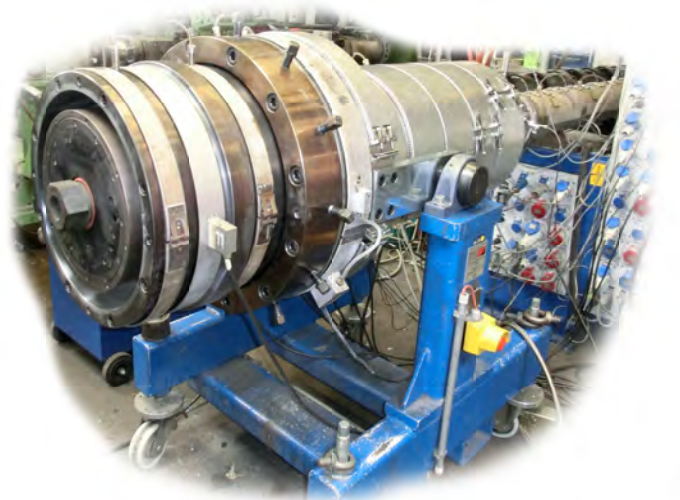


Bild 23 Extrusionswerkzeug RW-1-200/500 für dickwandige Rohre im praktischen Einsatz

Grenzen der Coextrusionstechnologie

Durch den Einsatz von Hochleistungspolymeren in coextrudierten Produkten wird mit geringstmöglichem Materialeinsatz eine kostengünstige Realisierung eines hochwertigen Produktes gewährleistet.

Grundvoraussetzung eines Coex-Verbandes ist die Kompatibilität der eingesetzten Rohstoffe, hier muss besonders die Haftung verschiedener Polymere untereinander beachtet werden um die Dauerhaftigkeit einer Struktur zu gewährleisten. Hier werden heute spezielle Haftvermittler eingesetzt um dieser Aufgabe gerecht zu werden. Die zumeist reaktiv arbeitenden Polymer Klebstoffe weisen teilweise eine geringe Alterungsbeständigkeit auf, was wiederum eine entsprechende Beachtung der Temperaturführung und der Verweilzeiten bei der Verarbeitung fordert.

So wie bei den hier beispielsweise benannten Eigenschaften der Haftvermittler sind es besonders die Polymere, die Grenzen in der Coextrusionstechnologie aufzeigen. Meist stellen vorgegebene Materialdaten wie Wärmeleitfähigkeit und rheologische Eigenschaften der Schmelzen nicht überwindbare Hindernisse dar. Stark unterschiedliche Schmelzpunkte von Polymeren in einer coextrudierten Struktur zeigen zusätzliche Grenzen bei der Herstellung auf. Schmelztemperaturen aller Polymere im Verbund vom Punkt der Zusammenführung bis zum Einlauf in die Kalibrierung dürfen nicht unterschritten werden.

Die Werkzeugtechnologie bietet hier die Möglichkeit die Grenze „Des technisch Machbaren“ weiter zu verschieben und damit komplexere leistungsfähigere Produkte herzustellen. Mit angepassten Spaltweitenverläufen, geeigneter äußerer und innerer Temperierung sowie der richtigen Auswahl des Werkzeugtyps gelingt es auch bei problematischen Polymerverbunden ein optimales Produkt zu fertigen.

Zusammenfassung und Ausblick

Wichtige Ziele bei der Auslegung von Extrusionswerkzeugen sind höhere Massedurchsätze bei geringen Druckverlusten und kürzeren Materialwechselzeiten. Die Auslegung für höhere Massedurchsätze ist jedoch nur sinnvoll wenn auch die Leistung der Gesamtanlage auf diese Daten ausgelegt ist. So steht momentan weniger der Durchsatz auf dem Prüfstand, als vielmehr die Produktqualität und die Gesamtanlageneffizienz bei kleinen Losgrößen. Die Berücksichtigung von verweilzeitabhängigen Einflüssen auf mechanische Kennwerte, die Vermeidung von Fließinstabilitäten bei der Coextrusion von Polymeren mit unterschiedlichem rheologischen Verhalten muss dabei bei der Auslegung in Einklang mit Anforderungen aus der Fertigungs- und Produktionstechnik gebracht werden. Die angewandten CFD - Simulationsmethoden unterstützen bei der Gewinnung weiterer Optimierungspotentiale. Für die Auslegung und die Bewertung der Leistungsfähigkeit und Effizienz eines Coextrusionssystems gibt es noch keine allgemein gültigen Ansätze zur Bewertung. Hier wird daran gedacht z.B. das theoretische Materialwechselverhalten bzw. die Verweilzeiten in verschiedene Bewertungskriterien mit einfließen zu lassen. Letztlich wird es auch zukünftig ein iterativer Prozess sein mit dem die Auslegung der Fließkanalgeometrie erfolgen wird. Hier zeigen sich erste Ergebnisse [3], die zukünftig eine automatisierte Auslegungsrechnung mit CFD in Aussicht stellt.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Fischer, „Wendel oder Spiralverteiler,“ *EXTRUSION*, 4 2006.
- [2] G. W. Ehrenstein und S. Pongratz, Beständigkeit von Kunststoffen, München: Carl Hanser Verlag, 2007.
- [3] K. Saul, „Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen,“ 2011.
- [4] P. Fischer und J. Wortberg, „Neue Wendelverteilerwerkzeuge,“ ETA Kunststofftechnologie - Download, http://www.eta-kunststofftechnologie.de/pdf-Dateien/Downloads/98_DE_Neue-Wendelverteilerwerkzeuge.pdf, 1998.
- [5] Volkswagen Konzernnorm, „TL 52439,“ Volkswagen Aktiengesellschaft, 2009-11.
- [6] A. Wieczorek, „Auslegung von Wendelverteilerköpfen für die Rohrextrusion,“ in *17. Leobener Kunststoff Kolloquium*, Auditorium Maximum der Montanuniversität Leoben, 2003.
- [7] O. te Heesen, „CFD-unterstützte Produktentwicklung eines Schmelzeverteilkonzeptes auf Basis der Definition und Verifizierung eines Werkzeug-Qualitätskriteriums,“ unveröffentlichte Diplomarbeit IPE Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen, 2010.
- [8] K. Kuhmann, „Mehrschichtrohre für Kraftstoffleitung,“ *KUNSTSTOFFE*, 11 2006.
- [9] G. Burmann, P. Fischer und J. Wortberg, „Schmelzeffluss im Circularverteiler,“ *KUNSTSTOFFE*, 9 2010.

Abbildungen:

<i>BILD 1 SCHNITT DURCH WANDUNG MIT DÜNNESCHICHTEN</i>	1
<i>BILD 2 GEOMETRIEABHÄNGIGE VERWEILZEITEN IN DER 0,05 MM RANDSCHICHT</i>	2
<i>BILD 3 GEOMETRIEBEREICHE BEI WENDELVERTEILERN</i>	3
<i>BILD 4 PRINZIP VERSCHIEDENER VORVERTEILSYSTEME [3]</i>	3
<i>BILD 5 FLIEßPFADE IN VERSCHIEDEN VORVERTEILSYSTEMEN</i>	4
<i>BILD 6 AUSBILDUNG DER SICHELSTRUKTUR BEI WENDELVERTEILER-SYSTEMEN</i>	4
<i>BILD 7 TYPISCHE WANDSTRUKTUR AUSBILDUNG DER "DOPPELSICHEL"</i>	4
<i>BILD 8 ETA-CIRCULARVERTEILER</i>	4
<i>BILD 9 CFD SIMULATION EINES CIRCULARVERTEILERS</i>	4
<i>BILD 10 IDEAL BERECHNETE UMFANGSVERTEILUNG</i>	5
<i>BILD 11 VERWEILZEITVERTEILUNG AM AUSTRITTSSPALT</i>	5
<i>BILD 12 REALE UMFANGSVERTEILUNG</i>	5
<i>BILD 13 ERGEBNIS GRENZLINIE ÜBER EINEN BEREICH VON 15° DES UMFANGS</i>	7
<i>BILD 14 AUSLEGUNG DER ÜBERLAPPUNG MITTELS CFD</i>	7
<i>BILD 15 VOLUMENMODELL FÜR NEUARTIGE UMFANGSVERTEILUNG</i>	7
<i>TABELLE 1 VERGLEICH AXIALWENDELVERTEILER UND CIRCULAR- BZW. RADIALVERTEILER [7]</i>	8
<i>BILDER 16 VERSCHIEDENE CIRCULARVERTEILER</i>	8
<i>BILD 17 DREISCHICHT COEXTRUSIONSWERKZEUG FÜR MEDIZINTECHNIK</i>	8
<i>BILD 18 FÜNF-SCHICHT COEXTRUSIONSWERKZEUG ZUR HERSTELLUNG VON WELL- UND GLATTROHREN FÜR AUTOMOTIVE ANWENDUNGEN</i>	9
<i>BILD 20 ANSICHT ETA - CIRCULARVERTEILER - CVI</i>	10
<i>BILD 21 ETA COEXTRUSIONSWERKZEUG MIT 2-FACH TEMPERIERUNG UND INTEGRIERTER ISOLIERUNG</i>	10
<i>BILD 22 EXTRUSIONSWERKZEUG FÜR GROßE ROHRE BIS 500 MM</i>	11
<i>BILD 23 EXTRUSIONSWERKZEUG RW-1-200/500 IM PRAKTISCHEN EINSATZ</i>	11

ⁱ Single Minute Exchange of Die (Toyota-Produktionssystem)