

Grundlagen und Strategie für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen

Georg Burmann, Johannes Wortberg

Extrusionswerkzeuge werden heute für vielfältige Anwendungszwecke in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt. Extrudierte Strange in vielfältigen Querschnittsformen finden in nahezu allen Branchen Anwendung. Als Beispiele seien hier kurz angeführt:

- Bauprodukte: Rohre, Profile, Designapplikationen
- Automobilindustrie: Folien als Halbzeuge, Benzinleitungen
- Medizintechnik: Schläuche

Die Durchmesserdimensionen reichen von mehr als 1 Meter Durchmesser (Großrohre Ø 2000 mm) bis hin zu Kapillarröhrchen mit weniger als 1 mm Durchmesser.

Für die Herstellung haben sich in den vergangenen 50 Jahren vielfältige Werkzeugsysteme auf dem Markt etabliert. In den letzten Jahren ist zu beobachten, dass mit weiterhin steigenden Anforderungen und Aufgabenstellungen die Vielfalt der Lösungsvarianten (Stack-Die; Spiralverteilersysteme) weiter zunimmt. Aufgrund von Zeit- und Kostendruck sowie erforderliche Leistungssteigerungen und spezielle Aufgabenstellungen machen Auslegungs- und Simulationsrechnungen unumgänglich. Nicht zuletzt können auch hinsichtlich geforderter Qualitätsmerkmale Werkzeugkonstruktionen gezielt überprüft werden.

Grundlagen für die Auslegung:

Allen Werkzeugen für verschiedene Anwendungen und Anforderungen ist gemeinsam, dass sie unter Anwendung bestimmter Strategien und Vorgehensweisen ausgelegt werden müssen.

Die Vorgehensweise einer Auslegungsrechnung wird nachfolgend bei Werkzeugen für kreisringförmige Extrudate beschrieben. Die nachstehend angesprochene Vorgehensweise ist aber auch für Werkzeuge anwendbar, die mit denen andere Extrudatquerschnitte hergestellt werden.

Bei der Auslegung von Werkzeugen für „Rundprodukte“ müssen die relevanten Fließkanalbereiche zwischen Extruderzylinder bzw. Siebwechsler-Adapter und dem ringspaltförmigen Austrittsspalt am Werkzeugende betrachtet werden. Folgende Fließkanalbereiche sind bezüglich der Querschnitte und Längen zu dimensionieren:

- Adapter zum Werkzeuganschluss, bzw. Siebwechsler
- Schmelzestromverzweigungen mit Schmelzkanälen im Werkzeug,
- Schmelzevorverteilersysteme (z.B. Spinnen, verzweigte Bohrungen, Kleiderbügel),
- Schmelze-Verteiler (z.B. Pinolensysteme und Wendelverteiler),
- Stau- oder Entspannungszonen,
- Zusammenführung der Einzelschichten bei Coextrusion,
- Gemeinsamer Fließkanal von der/den Schmelzestromzusammenführung(en) bis zum Erreichen des Düsenpalts bei Coextrusion,
- Spaltgeometrie in der durchmesserabhängigen Düseneinheit (Spaltweite, Parallelspaltlänge).

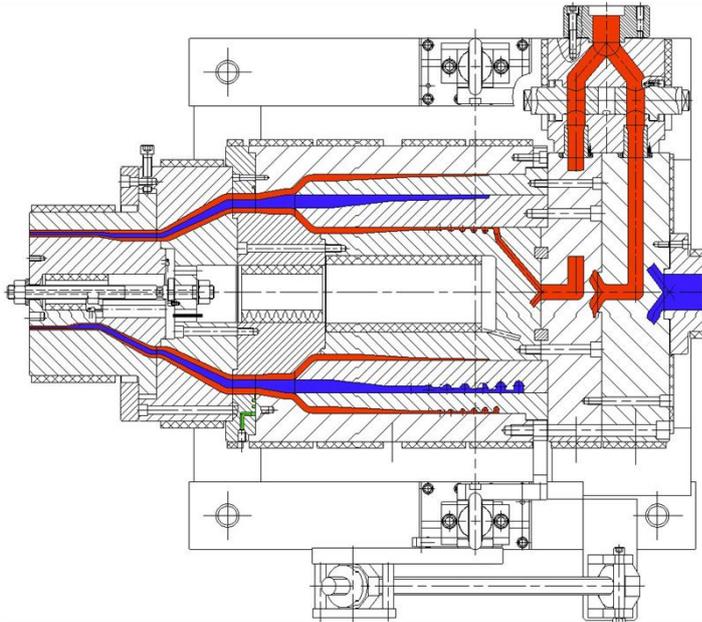


Bild 1 Aufteilung in Fließkanalbereiche – Adapter-Werkzeuganschluss – Schmelzestromverzweigungen – Vorverteilersystem – Wendelverteiler - Zusammenführungsbereich – Ringspaltgeometrie

Die Bildung von Modellen ist die Hauptaufgabe bei der Auslegungsrechnung. Für die vorstehend genannten Geometrie- bzw. Werkzeugbereiche stehen verschiedenen Lösungsansätze zur Verfügung, die nachstehend kurz erläutert werden. Es gilt (im Sinne der Kostenoptimierung) bei der praktischen Werkzeugauslegung den Simulationsaufwand so gering wie nötig und so gut wie erforderlich zu halten. Welche der möglichen Methoden im speziellen Problemfall die geeignete ist entscheiden im Wesentlichen die persönliche Erfahrungswerte.

Neben analytischen Lösungen für einfache Strömungsquerschnitte werden FDM (Finite Differenzen Methoden), FEM und die Netzwerktheorie eingesetzt.

Grundlage für die Berechnung von Strömungsvorgängen sind die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie. Diese Betrachtung wird auf einen Kontrollraum beschränkt, für dessen Ränder Randbedingungen (z.B. Druck, Geschwindigkeit, Temperatur) bekannt sind. Um mit möglichst einfachen und übersichtlichen mathematischen Modellen zu arbeiten müssen – abhängig vom gewählten Lösungsverfahren – Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden:

- Stationäre, laminare Strömung
- Trägheits- und Gravitationskräfte sind gegenüber Reibungs- und Druckkräften vernachlässigbar.
- Der Geschwindigkeitsgradient in Strömungsrichtung ist sehr viel kleiner als in Querrichtung.
- Die Kunststoffschmelze ist wandhaftend (Verweilzeit der Schmelze an der Werkzeugwand unendlich hoch)
- Konstanter Druckgradient im Kanalquerschnitt
- Konstante thermodynamische Kenndaten (Dichte, Wärmekapazität und Temperaturleitfähigkeit) der Schmelze.
- In Strömungsrichtung dominiert der konvektive Wärmetransport und quer dazu Wärmeleitung
- Isotherme oder adiabate Werkzeugwände werden vorgegeben

Grundlagen zur Beschreibung des rheologischen Stoffverhaltens

Zur Beschreibung des Fließverhaltens von Kunststoffschmelzen werden rheologische Stoffgesetze definiert, die den Zusammenhang zwischen dem Spannungszustand und den bis zu einem bestimmten Beobachtungszeitpunkt entstandenen gesamten Deformationsvorgang beschreiben. Im Detail betrachtet sind dies die Wechselwirkungen zwischen Atomen, Molekülen und Ionen.

Im klassischen Sinne handelt es sich nicht um Gesetze, sondern um Approximationsformeln oder Schubspannungsansätze, die Fließkurven ganz oder bereichsweise beschreiben.

Wichtig ist, dass die Parameter der Stoffgesetzes so gewählt bzw. ermittelt werden, dass das Materialverhalten im betrachteten Verarbeitungs- bzw. Schergeschwindigkeitsbereich korrekt beschrieben wird.

Berechnung einfacher Strömungsquerschnitte

Mit einfachen Gleichungen basierend auf der Methode der repräsentativen Viskosität können einzelne einfache Geometriebereiche von Extrusionswerkzeugen mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden. Diese einfachen Gleichungen liefern Informationen zu Druckverlusten, Schergeschwindigkeiten und Wandschubspannungen. Für die Auslegung durchströmter Kanalgeometrien ist diese analytische Lösung und Betrachtung einfach durchführbar und für praktische Belange ausreichend. Das Vorgehen bei der Optimierung eines Düsenaustrittsspalt ist qualitativ in Bild 2 gezeigt.

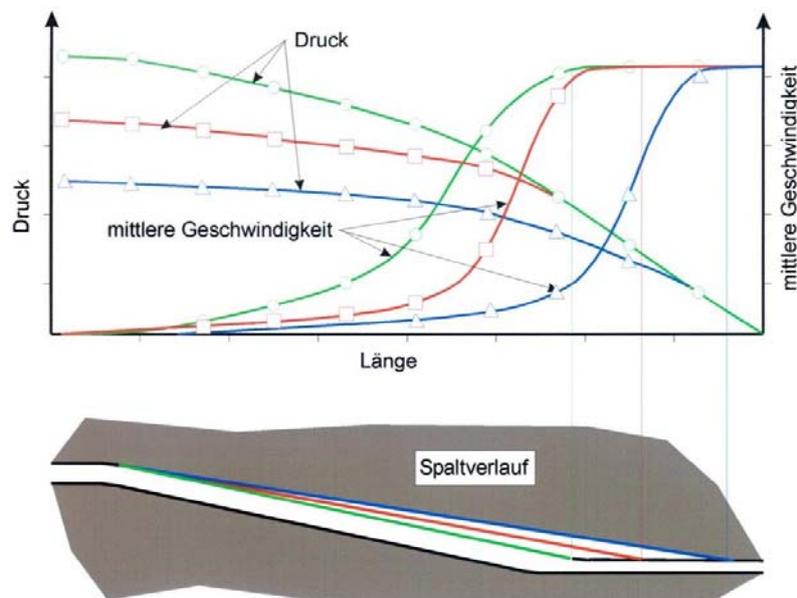


Bild 2 Druckoptimierung mit Hilfe einfacher Gleichungen zur Strömungsberechnung

Netzwerktheorie zur Berechnung komplexer Werkzeuggeometrien

Um Werkzeuggeometrien in denen komplexe Strömungen auftreten zu berechnen, ist es vorab erforderlich sich ein Bild über die einzelnen Strömungsphänomene in verschiedenen Teilabschnitten zu verschaffen. Zur Lösung der Aufgabe müssen Informationen zur Arbeitsweise bekannt sein. Damit werden Basiselemente definiert, für die wiederum Methoden bzw. analytische Gleichung zur Beschreibung lokaler Modelle aufgestellt werden. Großvolumige Strömungsvorgänge (z.B. Mischvorgänge oder das Kreuzen zweier Strömungen) können mit diesem Lösungsansatz nur sehr ungenau modelliert werden. Damit ist die Anwendung der Netzwerktheorie auf Kombinationen einfacher Strömungselemente beschränkt. Anwendung findet die Netzwerktheorie bei der Simulationsrechnung von:

- Breitschlitzverteiltern,
- Wendelverteiltern
- Einfachen Profilwerkzeugen
- Verteilersystemen (Heißkanalverteiler)

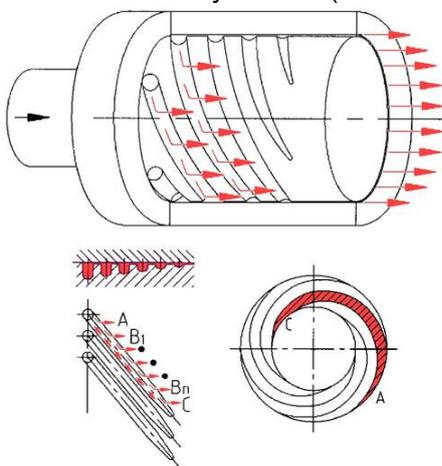


Bild 3
Arbeitsweise eines Wendelverteilers

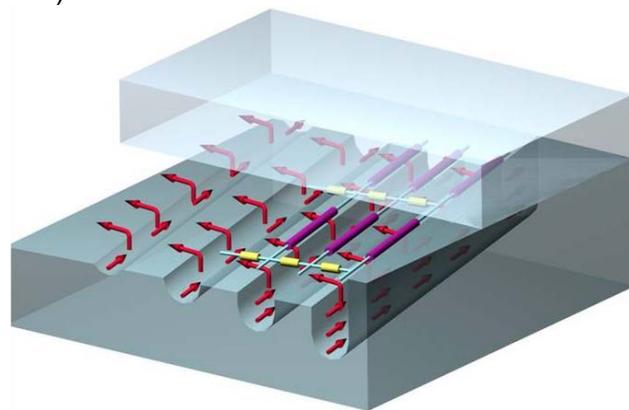


Bild 4
einfaches elektrisches Netzwerk

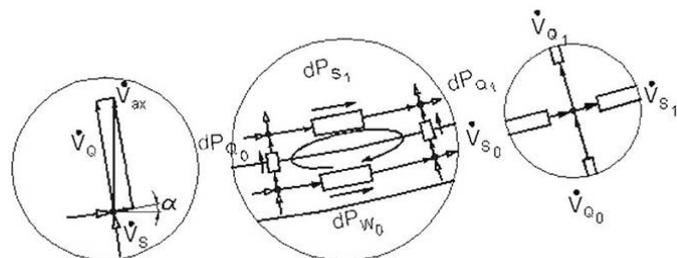
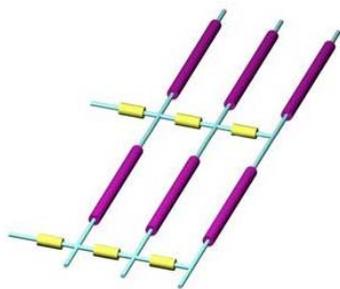


Bild 5 Netzwerkmodell zur Berechnung der Wendelströmung

Die einzelnen Strömungselemente werden über ein Gitter verknüpft. Verbindungslinien zwischen den Gitterpunkten (Knoten) repräsentieren die einzelnen, unabhängigen Fließkanäle bzw. Strömungselemente. Die Gleichungen für die jeweiligen einzelnen Elemente beschreiben im Gesamten gesehen den Zusammenhang zwischen Druckverlust und den einzelnen Teilvolumenströmen im Netzwerk. Das Gitternetz wird in Analogie zur elektrischen Netzwerken behandelt und berechnet. Dabei repräsentiert der Druckverlust die elektrische Spannung. Der Volumenstrom ist äquivalent zum elektrischen Strom und die elektrischen Widerstandselemente werden durch die Viskosität der Kunststoffschmelze verknüpft mit der Geometrie der Einzelemente beschrieben.

CFD¹ Numerische Strömungssimulation durch die Finite Elemente Methode

Die Simulation dreidimensionaler Strömungen mit der Methode der Finiten-Elemente (FEM) ermöglicht die Analyse komplexer Strömungsvorgänge in Werkzeugen und um beliebig geformte Körper. Es können sowohl laminare, als auch turbulente Strömungen betrachtet werden. Neben den Größen des Strömungsfeldes kann auch der Wärmeübergang zwischen Fluid und Werkzeugwand miteinbezogen werden. Bei der Finite Elemente Methode (FEM) wird in die betrachtete Geometrie ein Netzwerk generiert, dass in Zonen einfacher Strömungsverhältnisse grob und bei komplizierten Verhältnissen sehr fein ist. Innerhalb eines finiten Elementes kann von konstanten Materialeigenschaften ausgegangen werden, wodurch nur die Kontinuitäts- und Impulsgleichung gelöst werden muss und die Energiegleichung vorerst entfällt. Diese ist über die Temperaturabhängigkeit der Viskosität mit der Impulsgleichung gekoppelt.

Zur Optimierung von geometrischen Details, z. B. Einlaufgeometrien, Umlenkungen, Stromteilungen, sind dennoch wertvolle qualitative Hinweise zu bekommen.

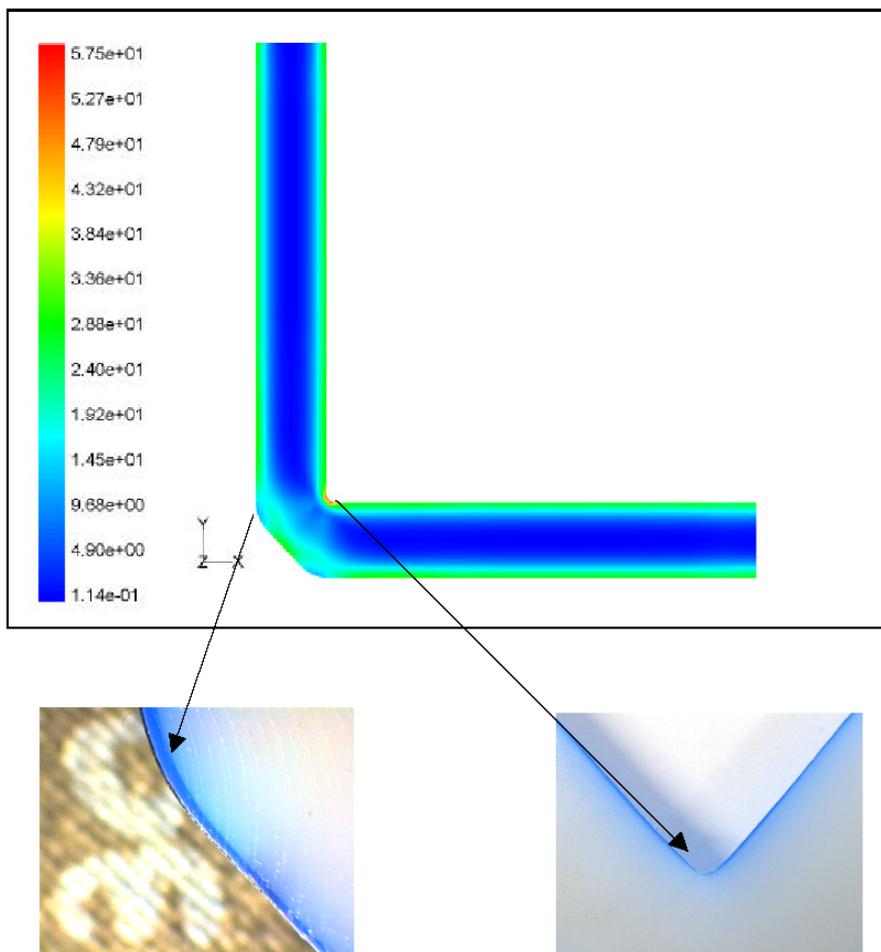


Bild 6 FEM Anwendungsbeispiel „Detailoptimierung Schmelzeumlenkung“

¹ CFD Computational Fluid Dynamics

Auslegungsstrategie - Ziele und Randbedingungen

Der Begriff der **Strategie** stammt aus dem Griechischen und bedeutet Heerführung. Ein Strategie war im antiken Griechenland ein gewählter Heerführer (*stratos* = Heer, *agein* = führen). Strategie meint soviel wie ein zielorientiertes Vorgehen, einen *langfristigen Plan*, im Gegensatz zur *kurzfristigen Taktik* als Teil einer Strategie.

Strategie beschreibt also ein genau geplantes Vorgehen zum Erreichen eines Zieles. Sie wird von den Auslegungszielen und Anforderungen abgeleitet und kann in Teilstrategien unterteilt werden.

Ein Extrusionswerkzeug muss passend auf die herzustellenden Produkte zugeschnitten sein. Dazu sind vielfältige produktionstechnische, konstruktive und produktspezifische Randbedingungen zu beachten.

Gleichmäßige Volumenstrom- bzw. Produktwanddickenverteilungen ohne qualitätsmindernde Fließnähte sind seit Jahren die herausragende Forderung beim Extrudieren von rotationssymmetrischen Produkten (Blasfolien, Schläuche, Rohre, Hohlkörper) [1,4,6,9,10,11,12]. Neben dieser Hauptforderung müssen moderne Konstruktionen, insbesondere für die Coextrusion, wichtige Zusatzkriterien erfüllen. Die zur Herstellung eines bestimmten Extrusionsproduktes zu beachtenden Regeln und Optimierungsziele lassen sich unabhängig vom eingesetzten Werkzeugsystem definieren.

Produktspezifische Anforderungen:

- gute Dickengleichmäßigkeit
- keine Beeinflussung mechanischer Materialkennwerte durch den Verarbeitungsprozess (geringe Scherbelastung, möglichst geringe Verarbeitungstemperaturen)
- konstante Austrittsgeschwindigkeit über dem Umfang
- Orientierungen der Moleküle im Produkt, günstiges Schwellverhalten am Düsenaustritt
- keine Qualitätsminderung durch Fließnähte, Fließmarkierungen (Inhomogenitäten der Schmelze)
- Bei Coextrusion:
 - Große Variationsbandbreite bzgl. Rohstoffkombinationen und Schichtdicken
 - Vermeiden von Grenzschichtinstabilitäten (Coextrusion)
 - Erzielen dünner Haftvermittler- und Barriere-Schichten
keine Qualitätseinbußen, geringe Materialkosten
 - getrennte Beheizung, Isolierung für Einzelschichten

Produktionstechnische Anforderungen:

- große Verarbeitungsbandbreite (Rohstoffe, Durchsätze, Temperaturen)
- niedrige Druckverluste,
- gute thermische Kontrolle, geringe Dissipation,
- geringe Verweilzeiten und enges Verweilzeitspektrum des Gesamtsystems Extruder, Schmelzefilter, Adapter, Werkzeug und dadurch Ausschußvermeidung
- schneller und vollständiger Material- bzw. Farbwechsel
- Fahren mit minimalem Restmassepolster (bei diskontinuierlicher Monoextrusion)
- lange Standzeiten,

Konstruktive, betriebstechnische Anforderungen

- kleines Bauvolumen, leichte (De)montage und Reinigung (möglichst keine bzw. geringe Anhaftung von Schmelze an den Fließkanaloberflächen)
- Wahl der Teilungen, Trennebenen
- Steifigkeit und Verzugsfreiheit, Dichtigkeit in den Trennebenen, auftretende maximale Betriebsdrücke
- Erforderlicher freier zentraler Innendurchmesser (Ummantelungsaufgaben, Innenluftaustausch, Mediendurchführung, Stützluft, usw.)
- Zentriermöglichkeiten
- Spaltverstellung (axial, radial)
- gleichmäßige Temperierung (außen, innen)
- Beachtung der thermischen Symmetrie für Werkzeug und Schmelzestrom
- FIFO-Prinzip (First-in-First-out bei diskontinuierlicher Monoextrusion)
- Vermeidung von Stagnationszonen und Totstellen
- Erweiterbarkeit durch Zusatzmodule (Farbstreifenbeispritzung, Beschichtungen)
- Konstruktion gemäß gültiger Maschinenrichtlinien und Sicherheitsnormen
- und nicht zuletzt günstige Fertigungsmöglichkeiten mit geringen Kosten.

Werkzeug – Prinzipien Vor – und Nachteile

Für kreisringförmige Extrusionsprodukte haben sich je nach Anforderung verschiedene Werkzeugsysteme am Markt etabliert.

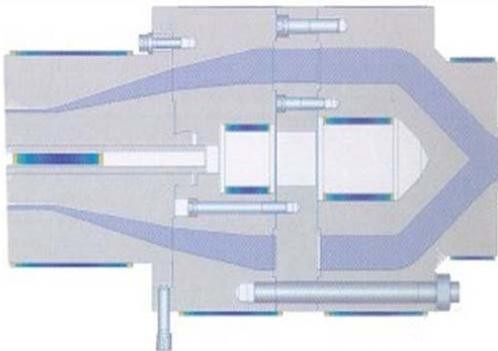


Bild 7: Dornhalterwerkzeug (Battenfeld)

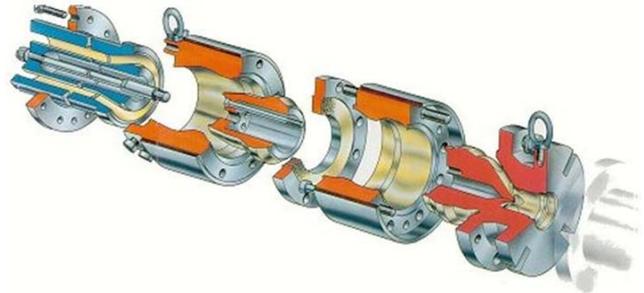


Bild 8: Werkzeuge mit Spinnenverteilern und Lochplatten (Krauss-Maffei)

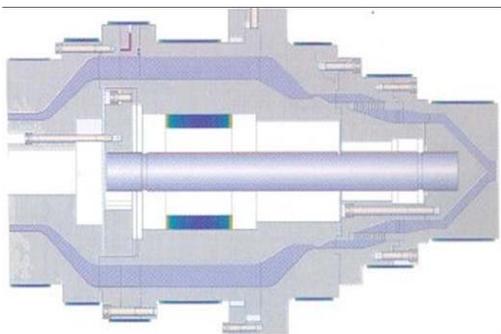


Bild 7: Siebkorbwerkzeug (Battenfeld)

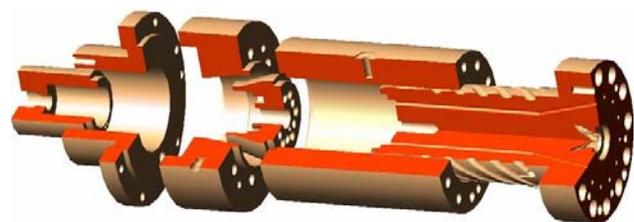


Bild 9 Werkzeug mit Wendelverteiler

Zu der heutigen Vielfalt unterschiedlicher Konstruktionskonzepte hat die Rechnersimulation sicherlich weniger beigetragen als die Kreativität der Ingenieure. Hinsichtlich der vorstehend genannten Kriterien ergeben sich abhängig vom Verteilprinzip Vor- und Nachteile.

Schmelzevorverteilsysteme

Konventionelle Lösung

Über lange Zeit wurde ausschließlich das Konzept verfolgt, Wendelverteiler mit Vorverteilersystemen aus verzweigten Bohrungen oder kreisförmigen Kanälen auszustatten, die jede Wendel aus jeweils einer Bohrung speisen. Bild zeigt beispielhaft eine solche konventionelle Lösung mit radial schräg gebohrten Vorverzweigungskanälen, welche direkt in die Wendeleinläufe münden (n = Anzahl der Bohrungen oder kreisförmigen Kanäle). Das Bild 10 macht deutlich, dass die mit Paste eingestrichenen Flächen nicht rund gedreht werden können, sondern gefräst werden müssen. Sonst würden Toträume zwischen den Wendeleinläufen die Funktionalität einschränken.



Bild 10: 1:1 Vorverteilsystem



Bild 11: 1:n Vorverteilsystem mit Kleiderbügel - Vorverteilung

Kleiderbügel-Vorverteilsystem

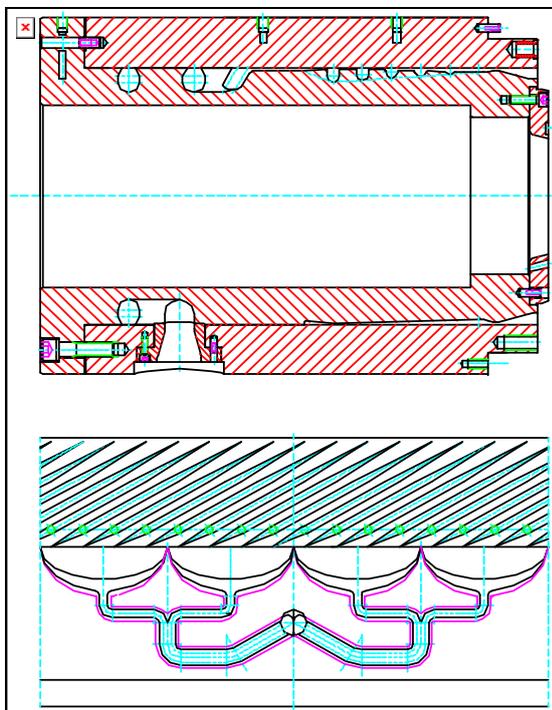
Heute haben sich auch Systeme etabliert, die die Vorverteilung in einen Ringspalt vorsehen. Dabei wird der Wendelverteiler - im Gegensatz zu früher eingesetzten sog. Verwischgewinden im Anschluss an Stegdornhalter [1] - als für die endgültige Schmelzeverteilung wesentliches Element beibehalten, d.h. die aus dem Ringspalt des Vorverteilersystems einströmende Schmelze wird nahezu vollständig in die Wendeleinläufe gedrückt.

Eine Möglichkeit zur Speisung eines Ringspalts am Ende des Vorverteilers ist der Kleiderbügel-Vorverteiler (häufig eingesetzt in Breitschlitzdüsen und manchmal auf Umlenkpinolen). Ausgeführte Varianten beginnen bei nur einem Kleiderbügel auf dem Umfang des Vorverteilersystems, der aus einer Bohrung oder einem Kanal axial oder radial eingespeist wird, und führen bis zu einem kombinierten Vorverzweigungssystem mit mehreren Kleiderbügelverteilern auf dem Umfang. Nach dem Ringspalt führt die Neuverteilung im Wendelverteiler aus der Überlappung von Axial- und Wendelströmungen zu sichelförmig über den Umfang verteilten Teilströmen und schließlich zu gleichmäßiger Schmelzeverteilung am Ende des Wendelverteilers.

Die Entkoppelung von Speisekanal und Wendel macht die Wendelanzahl unabhängig und kann von n bis zu Vielfachen von n je nach Aufgabenstellung und konstruktiven Randbedingungen variieren. Insbesondere bei Coextrusionswerkzeugen, bei denen die Anzahl einzelner Vorverzweigungsbohrungen aus konstruktiven Gründen begrenzt ist, kann durch die Entkopplung eine rheologisch und betriebstechnisch günstigere Version mit vergrößerter Wendelanzahl realisiert werden. In der Regel sind mehr und im Querschnitt kleinere Wendeln günstiger. Dies ist bei hochmolekularen und z.T. stark viskoelastischen Rohstoffen (z.B. PE-HMW-HD) von größerer Bedeutung (Bild 11) als bei niederviskosen Produkten (z.B. PA).

Ringkanal 2^n Vorverteilsystem

Oftmals muss eine Werkzeugkonstruktion so gewählt werden, dass ein möglichst großer freier zentraler Innenraum frei gehalten wird. Typische Aufgaben sind Rohrummantelungsaufgaben oder ein erforderlicher freier innerer Durchgang für intensiven Innenluftaustausch. Neben der Breitschlitz-Vorverteilung kann dann die Vorverteilung in einem 2^n Vorverteilsystem erfolgen: 1 Bohrung \rightarrow 2 Kanäle \rightarrow 2^n Kanäle \rightarrow 2^n Wendeln



Je nach Aufgabenstellung sind aber auch „Mischsysteme“ realisiert worden.

Der Querschnitt und die Abwicklung des Vorverteilersystems mit Wendelverteiler für ein Extrusionswerkzeug zur Ummantelung von Stahlrohren ist in Bild 12 dargestellt. Von der seitlichen Einspeisung wird die Schmelze über ein auf dem Umfang eingearbeitetes Verzweigungssystem 2^n in vier Kleiderbügel gleichmäßig vorverteilt. Daran anschließend wird die endgültige Schmelzeverteilung in einem Wendelverteiler mit - bei dieser Baugröße - 16 Wendeln vorgenommen. Das Grundwerkzeug besteht aus nur zwei Teilen und ist somit leicht zu (de)montieren.

Bild 12: Ummantelungs-Wendelverteilerwerkzeug mit seitlicher Einspeisung, Vierfach-Vorverzweigung und Kleiderbügelvorverteilern

Wendelverteilerkonzepte

Konzentrische Wendelverteilerwerkzeuge und „Stack-Dies“ („Pancake-Dies“)

Seit Anfang der neunziger Jahre werden Coextrusionswerkzeuge mit nicht-konzentrischen Wendelverteilern angeboten, insbesondere als Blasfolienwerkzeuge. Deren konstruktive Unterscheidungsmerkmale sind die radiale oder konische Anordnung der Wendelverteiler mit vorgeschaltetem Vorverzweigungssystem und seitlicher Schmelzeinspeisung [2,5,7,15,16]. Der Wendelverteiler ist bei diesem Prinzip in eine Ebene „geklappt“ bzw. um einen bestimmten Winkel „nach innen gekippt“ und liegt als *Spiralverteiler* vor. Durch die relativ flache Bauweise lassen sich Coextrusionswerkzeuge durch „stapeln“ (stack) einzelner Scheiben (pancake) konzipieren. Durch ihre Austauschbarkeit untereinander und Ergänzungsmöglichkeiten (z.B. für die Extrusion

von drei bis fünf oder sieben Schichten) versprechen diese eine größtmögliche Variabilität für den Anwender.

Den Vorteilen dieser Konstruktionen stehen aber auch einige Nachteile gegenüber. In Tabelle 1 wird der Versuch einer vergleichenden Bewertung vorgenommen. Aufgeführt sind Argumente grundsätzlicher Art; welches Konzept im konkreten Fall (Anwendung, Produkt, Abmessung(sbereich)) das geeignetere ist, kann nur durch praktische Erfahrung gewonnen werden.

Zur Festlegung der möglichen geometrischen Freiheitsgrade, wie Art und Umfang der Schmelzevorverteilung, Anzahl der Wendeln, Überlappung der Wendeln (Bauhöhe), Form der Wendeln sowie Wendelein- und -auslauf können die Simulationsmodelle z.T. Hinweise geben. Allerdings werden stets auch fertigungstechnische Aspekte und Kosten zu berücksichtigen sein; z.B. bei der Festlegung der Wendelanzahl und der Wendelquerschnittsform.

Tabelle 1: Konzentrische Wendelverteilerwerkzeuge vs. Stack-Dies (Pancake-Dies)

	Konzentrische Wendelverteiler	Stack Die (Pancake Die) Spiralwendelverteiler
Druckverlust	Fließwiderstände nach Zusammenführung gleich. Individuelle optimale Kanalauslegung für Einzelschichten.	Zusätzl. Fließwiderstände nach jeder Zusammenführung. Bei großen Werkzeugen ungünstig lange Fließwege.
Verweilzeit, Material- /Farbwechsel	Individuell für alle Einzelschichten bis zur Zusammenführung bestimmbar.	Nach jeder Zusammenführung <u>nicht</u> mehr individuell bestimmbar. Bei großen Werkzeugen wegen sehr langer Fließwege ungünstig.
Verteilung, Betriebspunktabhängigkeit	Zahl der Überlappungen nahezu unbegrenzt. Breites Betriebspunktspektrum.	Zahl der Überdeckungen begrenzt. Engeres Betriebspunktspektrum.
Schmelzezusammenführung	Beliebig sequentiell oder punktuell ausführbar (abhängig von Schichtstruktur).	<u>Nur</u> sequentiell ausführbar. Bei manchen Strukturen (Rohstoffen) ungünstig.
Schicht- /Fließstabilität	Durch Gestaltung der Zusammenführung optimierbar.	<u>Alle</u> Mehrschichtströmungen (2 bis n Schichten) müssen stabil sein.
Variabilität der Schichtstruktur	Nur sehr eingeschränkt variabel (z.B. über Anschlussadapter).	Variabel durch Austausch von Scheiben mit Höhenanpassung der Extruder / Adapter. Spaltweiten und Zusammenführung begrenzt anpassbar.
Einzelschichttemperierung	I.d.R. <u>nicht</u> möglich; Einfluss nur über gemeinsame Werkzeugtemperierung und Schmelzetemperatur aus Extruder.	Scheiben individuell temperierbar (ggf. Wärmeaustausch durch Metallkontakt zwischen den Scheiben).
Anzahl Bauteile	Relativ wenige Einzelteile und Schrauben; wenige Dichtflächen.	Z.T. viele Einzelteile und Schrauben; zahlreiche Dichtflächen.
Eignung für Innendurchführungen, Innenkühlung	Abhängig von Einspeisung und Vorverzweigung; bei seitlicher Einspeisung gut.	Wegen seitlicher Einspeisung gut, je nach Durchmesser jedoch eingeschränkt (Druckkräfte).



Bild 13: 3-Schicht Blasfolienwerkzeug mit inverser Schmelzuführung zur Vermeidung von Wendelstreifen

Während die meisten bekannten „Stack-Die“-Konzepte radial angeordnete Wendelverteiler besitzen, sind konische Ausführungen mit seitlicher Einspeisung und Vorverzweigung eine möglicherweise bessere Alternative, weil so eine größere Wendelüberlappung bei kleineren Außendurchmessern und Bauhöhen der einzelnen Module möglich wird. Ein entsprechendes 3-Schicht Blasfolienwerkzeug mit modularem Aufbau ist in Bild 13 vorgestellt.

Bei diesem Coextrusionswerkzeug wird die Schmelze in der Vorverteilung so umgelaugert, dass das bekannte Phänomen „Bildung von Wendelstreifen“ unterdrückt wird.

Geometrische Freiheitsgrade

Die hier gezeigten Werkzeuge sind im praktischen Einsatz bewährt und demonstrieren die mögliche konstruktive Vielfalt des Wendelverteiler-Prinzips. Eine aufgaben- und bedarfsgerechte Konzeptfindung ermöglicht in Verbindung mit individueller rheologischer, mechanischer und thermischer Auslegung eine optimale Problemlösung.

Inwieweit die Vorteile der Variabilität des „Stack-Die“-Konzeptes die möglichen Nachteile durch die eingeschränkte Anpassbarkeit der Schmelzezusammenführung und begrenzte Einflußnahme auf mögliche Grenzschichtinstabilitäten überwiegen, ist stark von der Anwendung abhängig. Im Bereich kleinerer Produktabmessungen sind die Vorteile größer als bei größeren Werkzeugdurchmessern. Für die Herstellung von Tuben und Rohren kleinerer Abmessungen bieten solche Spiralverteilersystem insbesondere im Bereich der Medizintechnik sicher Vorteile (Bild 14).

Es ist davon auszugehen, daß beiden Konstruktionsprinzipien – Spiralwendelverteiler und konzentrische Wendelverteiler – ihre jeweiligen spezifischen Anwendungen finden werden und weder das eine noch das andere Konzept dominierend sein wird. Schließlich hat das in vielen Kriterien überzeugende Wendelverteilerkonzept bis heute nicht in allen Anwendungen alternative Verteiler- und Werkzeugkonzepte verdrängt, wie z.B. Stegdornhalterköpfe für PVC [13].

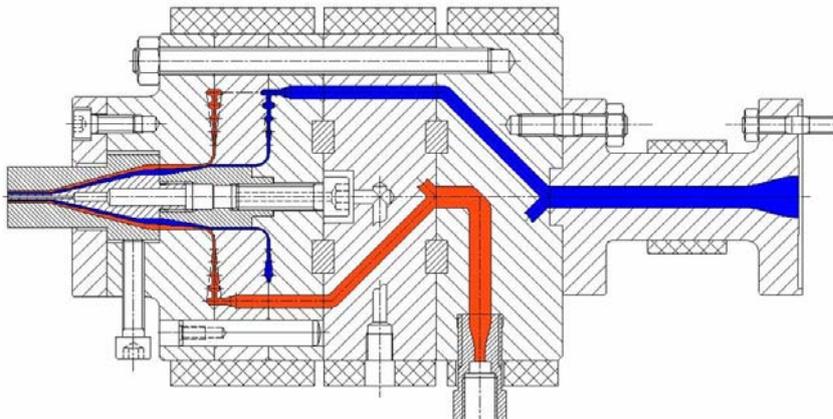


Bild 14: Coextrusionswerkzeug mit Spiral-Wendelverteiler

Coextrusionswerkzeuge

Die Auslegung und Simulation mehrschichtiger Strömungen in Coextrusionswerkzeugen verfolgen u.a. das Ziel der Vermeidung von Grenzschichtinstabilitäten. Allerdings sind für die konkrete Fließkanaldimensionierung lediglich einfache Grundregeln ableitbar. So kann z.B. empfohlen werden, die Spaltweiten vor und nach der Zusammenführung mehrerer Einzelschichten den spezifizierten Schichtaufteilungen im Produkt anzupassen [10]. Die häufig gestellte Frage nach der Bandbreite möglicher Massedurchsätze bzw. Volumenströme für Einzelschichten in Coextrusionswerkzeugen kann jedoch nicht allgemeingültig beantwortet werden. Dies hängt u.a. auch von den elastischen Schmelzeigenschaften ab, die nur mit sehr großem Aufwand bei Strömungssimulationen berücksichtigt werden können, insbesondere bei komplexen Scher-/Dehnströmungen.

Einschränkungen aufgrund der rheologischen (Un)verträglichkeit bestimmter Rohstoffe auf der einen und Druckverlust- sowie Verweilzeitkriterien auf der anderen Seite lassen eine ausreichend exakte theoretische Prognose der Grenzen des Verarbeitungsfensters nicht zu. Experimentelle Erfahrungen liegen meist nur für Referenzprodukte vor, so daß vor allzu großer Sicherheit bei der Machbarkeitszusage (z.B. Durchsatzbandbreiten von 1:10 oder größer) für bestimmte neue Mehrschichtprodukte nur gewarnt werden kann.

Demzufolge werden unterschiedlich gestaltete Zusammenführungsprinzipien eingesetzt, deren Konzeption abhängig von Erfahrungswerten gewählt wird (Bilder 15 und 16).

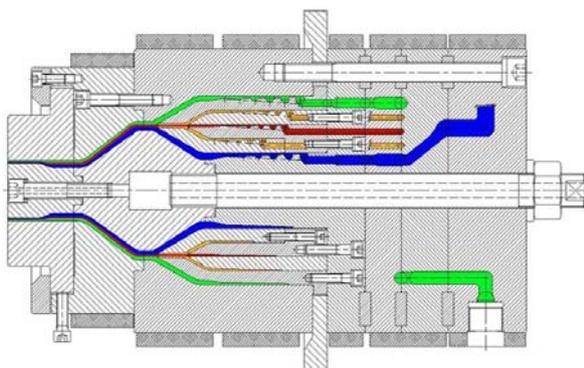


Bild 15: Zusammenführung der Schmelzen in einem Punkt

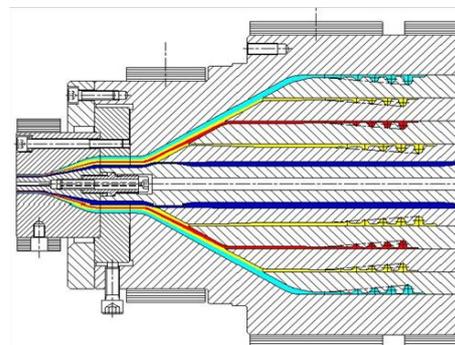


Bild 16: sequentielle Zusammenführung der Schmelzen

Verschiedene Materialien

Ein Wendelverteilerwerkzeug kann und muß in der Regel für mehrere Materialien, d.h. deren Verarbeitungstemperaturen und Massedurchsätze optimiert sein. Im Zielkonflikt zwischen Druckverlust und Verweilzeit muß die Dimensionierung der Fließkanäle für die zähste Schmelze (größte Viskosität) bei Vorgabe eines maximal tolerierbaren Druckverlustes je Strömungsabschnitt erfolgen. In Bereichen kritischer Umlenkungen oder Strömungsverzweigungen sowie für die Wendelgeometrie sind Verweilzeitkriterien ggf. wichtiger als lokale Druckverluste, während in einfachen kreisförmigen Fließkanälen (Bohrungen) niedrige Druckverluste bei noch günstiger Verweilzeit Vorrang haben können.

Die Schergeschwindigkeiten sollten im Auslegungsfall in der Regel nicht unter 5 s^{-1} und nicht über 50 s^{-1} liegen, damit noch ausreichende Wandschubspannungen für akzeptable Material- oder Farbwechsel sorgen. In wenigen Fällen wie z.B. in Kabel- und Leiterummantelungswerkzeugen oder bei niedrigviskosen Schmelzen können die Schergeschwindigkeiten bis 1000 s^{-1} betragen.,

Düseneinheiten für variable Produktabmessungen

Bei großen Produktionsmengen gleicher oder einheitlicher Produkte werden vielfach Einzweckwerkzeuge eingesetzt. Wegen der dortigen Marktgegebenheiten ist dieses Prinzip beispielsweise kennzeichnend für zahlreiche Werkzeugkonstruktionen aus den USA. Hier in Europa ist die Situation anders: Flexibilität wird gefordert, auch hinsichtlich der mit einem Grundsystem herstellbaren Produktvarianten. Ein typisches Beispiel sind Rohrwerkzeuge, die einen möglichst großen Abmessungsbereich der Rohre (Durchmesser und Wanddicken) überdecken sollen. Der möglichst produktionsgerechten Gestaltung von Zentriersystemen kommt eine entscheidende Bedeutung zu.

An die Wendelverteiler-Grundwerkzeuge werden – direkt oder über austauschbare Zwischenteile – Düseneinheiten angeschlossen, deren Fließkanäle die Schmelze auf die Austrittsquerschnitte ausformen. Bei der Gestaltung dieser Fließkanalbereiche ist produkt- und materialabhängig unterschiedlichen Kriterien Rechnung zu tragen.

Ausgehend von dem Basisdurchmesser am Ende des Wendelvertailers, oder bei Coextrusionswerkzeugen an der Zusammenführung der Einzelschichten, kann der Ringkanal nach innen, geradeaus oder nach außen geführt werden. Bei der Rohrextrusion erfolgt in der Regel eine Verkleinerung auf kleinere Durchmesser, bei Schlauchfolienwerkzeugen und Werkzeugen für Grossrohre dagegen meist eine Vergrößerung in Richtung Austrittsspalt. In jedem Fall sollte auf eine stetig beschleunigte Strömung geachtet werden.

Bild 17 zeigt die Bandbreite der Düseneinheiten eines Wendelverteilerwerkzeugs zum Ummanteln von Stahlrohren mit PE. Wegen des freien Durchgangs im Grundwerkzeug für das größte Rohr sind alle Düsenaustritte kleiner als der Durchmesser des Wendelvertailers.

Bei diesem Beispiel ist auch eine Einrichtung zum Aufbringen von Farbstreifen auf der Ummantelung vorgesehen.

Immer geringere Losgrößen erfordern einfaches Werkzeug - Handling und Vorrichtungen zum schnellstmöglichen Erreichen von „Gutproduktion“. Bild 18 zeigt eine auf diese Belange hin optimierte Düseneinheit. Die zentrierbare Aufspannplatte verbleibt bei Dimensionswechsel im Werkzeug. Die vor dem Düsenwechsel eingestellte Zentrierstellung bleibt während der Montage der Düsenteile erhalten.

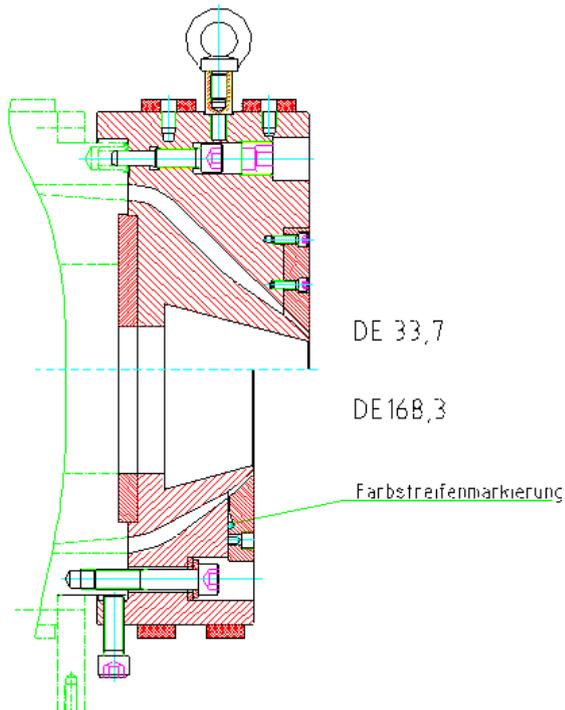


Bild 17: Düseneinheiten mit Farbstreifenmarkierung für ein Ummantelungswerkzeug

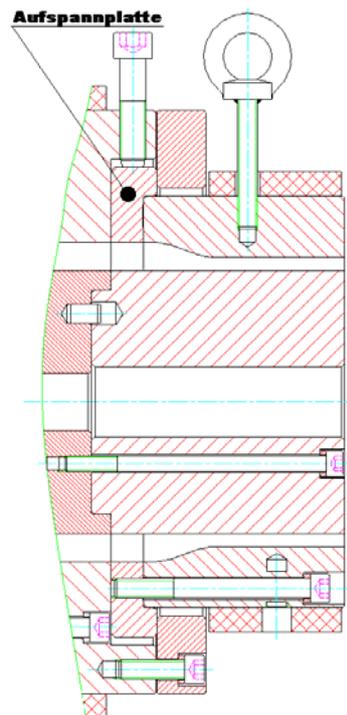


Bild 18: Düseneinheit mit fest zentrierbarer Aufspannplatte

Besonders im Bereich der Rohrextrusion erfordern ständige Produktwechsel variabel gestaltbare Austrittsquerschnitte für Düseneinheiten. Das System „Quick-Switch“ (Krauss-Maffei) wird vielerorts diskutiert. Ob nun eine komplette Anlage für die Produktion variabler Durchmesser ausgestattet sein muss, soll hier nicht diskutiert werden. Werkzeugkonzepte mit variabel einstellbaren Düsenaustrittsspaltweiten, wie dies schon seit Jahrzehnten im Bereich der Blasköpfe eingesetzt wird, werden sicher in den kommenden Jahren den Markt erobern. Ein solches Rohrwerkzeug ist im Bild 19 dargestellt.

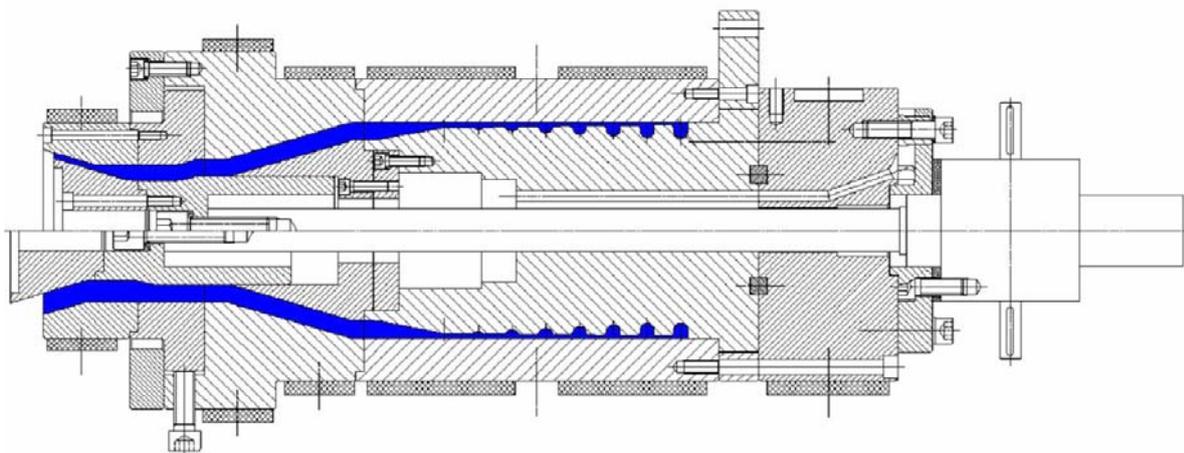


Bild 19: Rohrextrusionswerkzeug mit axialer Austrittsspaltverstellung

Thermische Auslegung

Der Temperaturführung bei der Produktion und der thermischen Auslegung bei Konzeption und Konstruktion von Extrusionswerkzeugen beeinflusst in entscheidendem Maß die Produktqualität. Zu hohe Wandtemperaturen an den Schmelzkanälen hervorgerufen durch fehlerhaft eingestellte Produktionstemperaturen oder durch ungenügend durchdachte Konstruktionen können entscheidend für die Herstellbarkeit – insbesondere von Coextrusionsprodukten – sein. Zur Beurteilung muss der gesamte „Heisstiel“ (Extruder, Siebwechsler, Adapter und Extrusionswerkzeug) untersucht werden. Entscheidend ist, dass das Werkzeug auf die Verarbeitungstemperaturen optimal angepasst werden können. Dazu sind in Sonderfällen der Einbau von Innentemperiersystemen (Öl- bzw. Wasserkühlung) sinnvoll. Thermische Trennungen können bei konzentrischen Wendelverteilern aber auch durch die Integration von Isolierschichten (ausgeführt als Vakuumkammern) realisiert werden. Bei der Verarbeitung von thermisch sensiblen Rohstoffen müssen oftmals aufwendige und kostenintensive Spüloperationen durchgeführt werden. Durch Einsatz von Keramikrippensteinen zur Intensivierung des Wärmeaustausches sind einfache Luftkühleinrichtungen herstellbar, die das Verweilen thermisch kritischer Rohstoffe bei hohen Temperaturen im Werkzeug drastisch reduzieren.

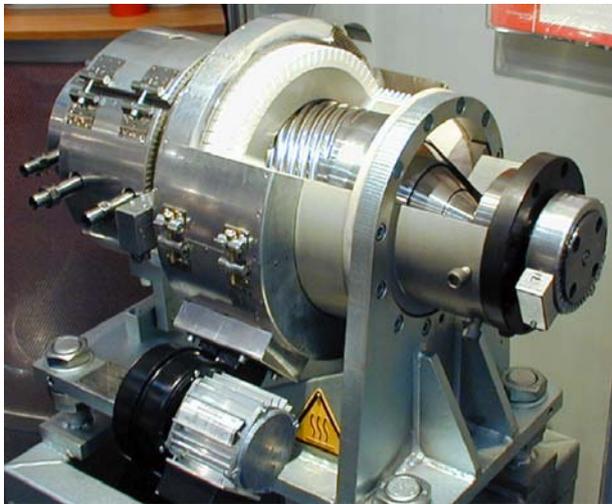


Bild 19: 5-Schicht Rohrcoextrusionswerkzeug mit Heiz-Kühleinheit aus Keramikrippensteinen



Bild 20: 6-Schicht Coextrusionswerkzeug zur KKB-Herstellung Düsens-Ø max. 1000 mm mit Heiz-Kühleinheit

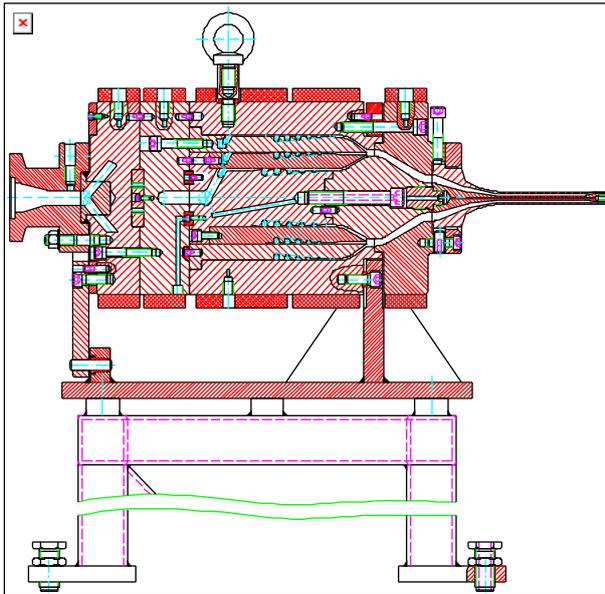
Neue Anforderungen an Extrusionswerkzeuge

Die Komplexität neuer Produkte, die durch erweiterte Rohstoffauswahl und Mehrschichtigkeit in vielen Fällen die Einsatzgrenzen von „Standardwerkzeugen“ überschreitet, erfordert mehr denn je angepasste Extrusionstechnik, insbesondere Werkzeugtechnik. Außer den geometrischen Freiheitsgraden gewinnen die Oberflächen- und Beschichtungstechniken an Bedeutung. Neben den bewährten galvanischen Beschichtungsverfahren (Verchromen, Vernickeln) für übliche im Werkzeugbau eingesetzte Stähle (z.B. C45 oder C60) können neuartige Beschichtungen mit verbesserten Reib- und Hafteigenschaften in Zukunft auch für die Extrusionswerkzeugtechnik von großem Interesse sein. Erste Ergebnisse mit z.B. „Diamond-Like-Carbon“ (DLC) - Beschichtungen von Düsentteilen sind vielversprechend [8]. Von besonderem Interesse ist der Einfluß auf Ablagerungen im Fließkanal und am Düsenaustritt. Da PVD-Beschichtungsverfahren

ggf. zusätzliche Anforderungen an den Grundwerkstoff und die Geometrie der Teile stellen, sind Werkzeugkonstrukteure neu gefordert.

In den Bildern 21 und 22 sind die Ergebnisse von Laborversuchen mit einem Blasfolienwerkzeug dargestellt, dessen Dorn mit unterschiedlichen Beschichtungen ausgestattet wurde. Das Ausmaß der Ablagerungen wurde als Referenz für die Beurteilung der Oberflächeneigenschaften herangezogen.

Werkzeugbeispiele



Das in Bild 23 gezeigte Dreischichtwerkzeug für kleine Wellrohre wurde für jeweils ca. ein Drittel Schmelzeanteil je Wendelverteiler ausgelegt. Dieses Beispiel soll zeigen, daß Wendelverteilterchnik auch für kleinere Rohrdimensionen anwendbar ist. Das gilt beispielsweise auch für kleinere Rohre auf Basis Polyamid, die einlagig oder als Mehrschichtrohre im Automobilsektor verwendet werden, z. B. für Kraftstoffleitungen.

Bild 23: Dreischicht-Wendelverteilerwerkzeug für Wellrohre;
1 Bohrung → m Bohrungen / Kleiderbügel → n Wendeln

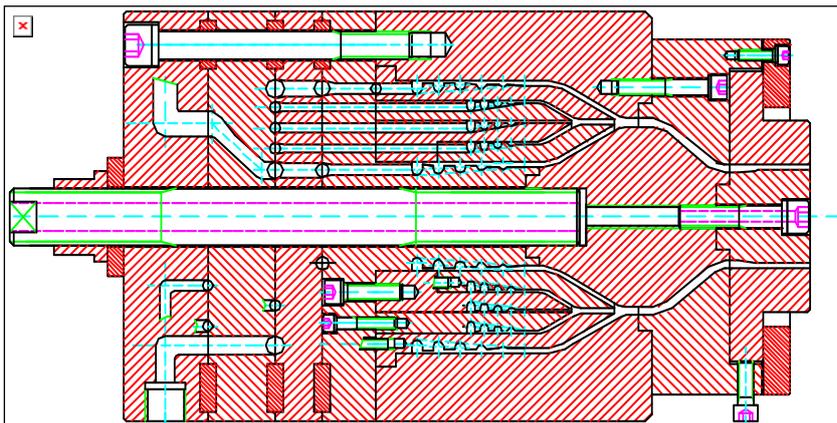


Bild 24: Fünfschicht-Wendelverteilerwerkzeug mit seitlicher Schmelzeinspeisung und Ringkanal-Vorverzweigung;
1 Bohrung → 2 Kanäle → 2ⁿ Kanäle → 2ⁿ Wendeln

Bild 24 zeigt ein Fünfschicht-Werkzeug für kleine Rohre und Schläuche, bei dem wegen der Notwendigkeit einer zentralen Durchführung, z.B. für Beschichtungsaufgaben oder ein Temperaturmedium, ausgehend von seitlicher Einspeisung und entsprechender Schmelzeumlenkung die Vorverzweigung in Ringkanälen geschieht. Bei dieser Art der Vorverzweigung werden entspre-

chend der 2ⁿ-Potenzreihe z.B. 8 oder 16 Speisebohrungen für den jeweiligen Wendelverteiler erreicht. Die Bohrungsdurchmesser sowie die Fließkanalquerschnitte in den Wendelverteilern werden - wie vorne erläutert - den Produktspezifikationen angepaßt für einen optimalen Kompromiß zwischen Strömungswiderstand und Verweilzeit.

Das in Bild 25 gezeigte Sechsschicht-Werkzeug wird eingesetzt für die kontinuierliche Extrusion von Vorformlingen in Blasformanlagen für Kraftstofftanks und Einfüllstutzen. Hier werden drei Dünnschichten (EVOH als Barriere und je einmal Haftvermittler) eingebettet in zwei Schichten aus hochmolekularem PE-HD, und als sechste und dickste Schicht (2. Schicht von außen) wird ein hoher Anteil von Mahlgut (Butzen u.a.) coextrudiert. Besonders wichtig ist der geringe Anteil der Dünnschichten am Gesamtverbund, was nur bei enger Schichtdickenverteilung möglich ist [12]. Die Dickschichten werden nach konventionellem Konzept (n Bohrungen / n Wendeln) gespeist, die Dünnschichten mit der Kombination Bohrung(en) / Kleiderbügel / n Wendeln.

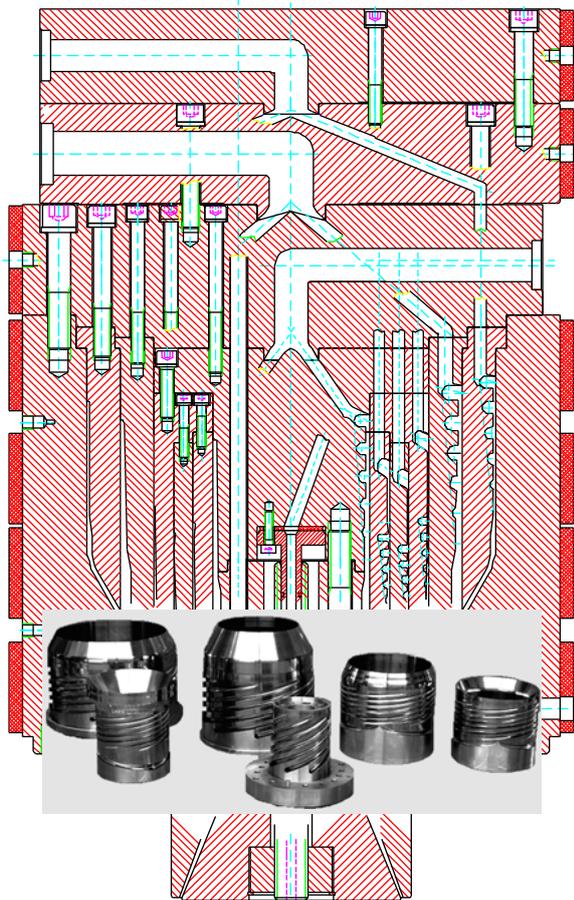


Bild 25: Sechsschicht-Wendelverteiler-Schlauchkopf,
 Dickschichten: n Bohrungen → n Wendeln,
 Dünnschichten: 1 Bohrung → m Bohrungen / Kleiderbügel
 → n Wendeln

Die gezeigten Beispiele belegen die konstruktive Flexibilität des Wendelverteilerprinzips in Verbindung mit aufgabenspezifisch unterschiedlichen Vorverzweigungs- und Vorverteiler Ausführungen. Weitere Anstrengungen konzentrieren sich auf die verfahrens- und fertigungstechnische Optimierung von Werkzeug- bzw. Fließkanal details, die einer einfachen rechnerischen Optimie-

rung (noch) nicht zugänglich sind. Verbesserungen in der Temperierung von Extrusionswerkzeugen sind ebenfalls möglich und sinnvoll.

Literatur

- [1] Michaeli, W. Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk, 2. Auflage, Hanser Verlag, München, 1991
- [2] Perdikoulis, J
Petric, J. Developments in annular coextrusion die design. SPE-RETEC '91: Coextrusion VI, Arlington Heights
- [3] Wortberg, J. Rechnerunterstützung bei der Blaskopfauslegung. In: Rechnereinsatz beim Blasformen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [4] Wortberg, J. Rohrwerkzeuge für Polyolefine und technische Kunststoffe. SKZ-Fachtagung: Extrusionswerkzeuge für Profil und Rohr Würzburg, 31.05.1995
- [5] Bode, W. W Design considerations for concentric mandrel and stackable coextrusion blown film dies. SPE-ANTEC '95, Boston, pp. 32 - 39
- [6] Wortberg, J. Design of spiral mandrel coextrusion heads for blow molding. SPE-ANTEC '95, Boston, pp. 936 - 942
- [7] N.N. Neuer Fünf-Schichtblaskopf (FBF) mit Spiralverteiler. Firmenschrift Hosokawa Alpine AG, Augsburg, 1995
- [8] Grischke, M. Hartstoffschichten mit niedriger Klebneigung JOT (1996) 1, S. IV - VII
- [9] Berghaus, U. Hochleistungsextrusion von Polyolefinrohren. Kunststoffe 85 (1996) 6, S. 776 - 782
- [10] Burmann, G.
Wortberg, J. Wendelverteiler für Folien, Rohre und Vorformlinge. Plastics No. One (1995) 11, S. 21 - 29
- [11] Schmitz, G. Blasfolienextrusion - Detailverbesserungen bei Anlagen und Automatisierung. Kunststoffe 85 (1995) 12, S. 2118 - 2122
- [12] Esser, K
Franke, M.
Wortberg, J. Sechs Schichten halten dicht - Coextrusionsblasgeformte Kunststoffkraftstoffbehälter. Kunststoffe 86 (1996) 8, S. 1120 - 1122
- [13] N.N. Rohrköpfe für PVC und ABS. Plastics-Special 7-8 (1996) 12, S. 24-25
- [14] Fischer, P. Extruder- und Werkzeugtechnik. Plastics-Special (1996) 12, S. 12 - 14
- [15] N.N Multicone - modularer Folienblaskopf. Firmenschrift Windmüller & Hölscher, Lengerich 1997
- [16] Mayer, A.
Butler, T.
Yap, P. Blasfolientechnik im Spannungsfeld von Preis und Leistung. Kunststoffe 87 (1997) 11, S. 1584 - 1592
- [17] Wortberg, J. Neue Wendelverteilerwerkzeuge. Kunststoffe 88 (1998) 2, S. 175-180

Anhang: Berechnung einer einfachen Strömung

Stoffgesetze:

Flüssigkeiten lassen sich aufgrund ihrer Fliesseigenschaften in zwei Gruppen einteilen

- Newtonsche Flüssigkeiten
- nicht Newtonsche Flüssigkeiten

Das Newtonsche Fließverhalten wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$\tau = \frac{\eta}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

Mit: der Schubspannung τ ; der Viskosität η ; und der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$

Dieses Fließverhalten tritt bei Kunststoffschmelzen nur bei sehr kleinen Schergeschwindigkeiten auf.

Abweichungen von dem o.g. Stoffgesetz zeigen sich durch die Strukturviskosität oder das Vorhandensein einer Fließgrenze (Bingham-Verhalten). Für nicht zu große Schergeschwindigkeitsbereiche lässt sich dieses Verhalten durch einen Ansatz nach Ostwald - de Waele (Potenzgesetz) beschreiben.

$$\dot{\gamma} = \phi \cdot \tau^m \quad (2)$$

Mit (1) erhält man die übliche Darstellung der Viskositätsfunktion

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Der Potenzansatz wird häufig angewandt, da er mathematisch leicht zu handhaben ist. Jedoch ergeben sich einige Aussagen, die physikalisch unschön oder unsinnig sind. So hängt die Dimension von k vom Fließindex n ab. Wenn beim Potenzansatz die Schergeschwindigkeit gegen den Grenzwert 0 zustrebt, strebt die Viskosität gegen unendlich.

Das heißt, dass derjenige Bereich der Fließkurve, der eigentlich durch eine schergeschwindigkeits-unabhängige Nullviskosität gekennzeichnet ist, sich nicht mit dem Potenzansatz korrekt wiedergeben lässt.

Da die Fließkurve in doppeltlogarithmischer Darstellung in der Regel einen nichtlinearen Verlauf hat, wird mit dem Potenzansatz das tatsächliche Stoffverhalten nur innerhalb begrenzter Schergeschwindigkeitsbereiche zutreffend gekennzeichnet. Für $n = 1$ geht der Potenzansatz in den Ansatz nach Newton über.

Weitere Ansätze:

- Bingham - Ansatz
- Polynomansatz
- Ansatz nach Prandtl - Eyring - Ree
- CARREAU - Ansatz

usw.

Pysikalische Interpretation des CARREAU - Ansatzes

Mit dem dimensionsmäßig korrekten CARREAU - Ansatz lässt sich das tatsächliche Stoffverhalten innerhalb eines breiten Schergeschwindigkeitsbereiches richtig wiedergeben. Die Viskosität wird nach CARREAU durch folgenden Ansatz beschrieben:

$$\eta = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^C} \quad (3)$$

Für $\dot{\gamma} = 0$ lässt sich der Stoffwert A als Nullviskosität interpretieren.

Diese Interpretation ist nur dann zulässig, wenn die Messung auch tatsächlich in einem Bereich mit sehr kleinen Schergeschwindigkeiten vorgenommen wurde. Wird hingegen lediglich eine Extrapolation der Viskositätsfunktion vorgenommen, so erhält man für die Nullviskosität A keine zuverlässigen Werte.

Für die stoffcharakteristische Grösse B , auch reziproke Übergangsschergeschwindigkeit genannt, gilt:

$$B = \frac{1}{\dot{\gamma}_k} \quad (4)$$

Die Stoffkonstante C lässt sich als die Steigung der Funktion bei hohen Schergeschwindigkeiten interpretieren und ist mit dem Fliessexponent des Potenzgesetzes n durch folgende Beziehung verknüpft:

$$C = 1 - n \quad (5)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität wird durch einen Verschiebungsfaktor a_T berücksichtigt. Auch zur Berechnung dieses Faktors sind mehrere Ansätze entwickelt worden.

Bei der Berechnung von Rohr-Ringspaltgeometrien wird der Ansatz von Williams, Landel und Ferry (WLF-Gleichung) angewandt, die als Parameter die sogenannte Standardtemperatur beinhaltet. Die Standardtemperatur liegt etwa 50°C oberhalb der Einfrieretemperatur.

$$\log a_T = \frac{C_1 \cdot (T_0 - T_S)}{C_2 + (T_0 - T_S)} - \frac{C_1 \cdot (T_M - T_S)}{C_2 + (T_M - T_S)} \quad (6)$$

Mit:

T_0 = Bezugstemperatur

T_M = aktuelle Massetemperatur

T_S = Standardtemperatur

$C_1 = 8,86$ und $C_2 = 101,6$

Damit lautet der CARREAU - Ansatz für die Viskosität unter Berücksichtigung der Temperaturverschiebung:

$$\eta = \frac{A \cdot a_T}{(1 + B \cdot \dot{\gamma} \cdot a_T)^C} \quad (7)$$

Berechnung einfacher Strömungskanalgeometrien

Methode der repräsentativen Viskosität

Zur Berechnung der Rohr- bzw. Ringspaltströmung wird die Methode der repräsentativen Viskosität angewandt. Dabei nimmt man an, dass es bei einer laminaren und isothermen Druckströmung und bei Wandhaftung der Schmelze eine Stelle gibt, an der eine newtonische und eine nicht-newtonische Schmelze bei gleichem Volumenstrom die gleiche Schergeschwindigkeit besitzen.

Druckverlustberechnung Rohrquerschnitt

Das Verhältnis des repräsentativen Radius R_s und des Rohrradius R ist abhängig von Fließexponenten n des Potenzgesetzes:

$$e^\circ = \frac{R_s}{R} = \left(\frac{4}{3 + \frac{1}{n}} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Das ermittelte Verhältnis ist auch bei unterschiedlichen Fließexponenten nahezu konstant und kann mit dem konstanten Faktor $e^\circ = 0,815$ angegeben werden.

Der entscheidende Vorteil des Verfahrens der repräsentativen Viskosität liegt darin, dass statt der etwas unhandlichen Gleichungen, die das rheologische Verhalten des Rohstoffs in Form des Potenzgesetzes berücksichtigen, die einfachen Gleichungen für newtonische Flüssigkeiten zugrunde gelegt werden.

Bei Änderung der Rohr- bzw. Ringspaltgeometrie muss die Viskosität η für jeden Querschnitt neu bestimmt werden, da gilt:

$$\eta = f(\dot{\gamma}) \text{ und } \dot{\gamma} = f(R)$$

Mit der repräsentativen Schergeschwindigkeit $\bar{\dot{\gamma}}$ ergibt sich die repräsentative Viskosität $\bar{\eta}$ bei einem Rohr mit Radius R aus folgenden Gleichungen:

$$\bar{\dot{\gamma}} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^3} \cdot e^\circ \quad (8)$$

$$\bar{\eta} = \frac{A}{(1 + B \cdot \bar{\dot{\gamma}})^C} \quad (9)$$

Bei unterschiedlicher Masse- und Bezugstemperatur wird die Temperaturabhängigkeit der Viskosität nach (7) berücksichtigt. Der Volumenstrom \dot{V} muss allerdings aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Materialdichte ρ ebenfalls auf die Massetemperatur T bezogen werden. Dazu wird die Steigung ρ_m der Dichte in Abhängigkeit der Temperatur angegeben. Mit dem vorgegebenen Massestrom \dot{m} und der Bezugstemperatur T_0 ergibt sich:

$$\dot{V}(T) = \frac{\dot{m}}{\rho(T_0) + \rho_m \cdot (T - T_0)} \quad (10)$$

Wie oben bereits erwähnt, wird zur Druckverlustberechnung bei einem Rohr der Länge L und dem Radius R auf die Gleichung für newtonische Flüssigkeiten zurückgegriffen:

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \bar{\eta} \cdot \dot{V} \cdot L}{\pi \cdot R^4} \quad (11)$$