

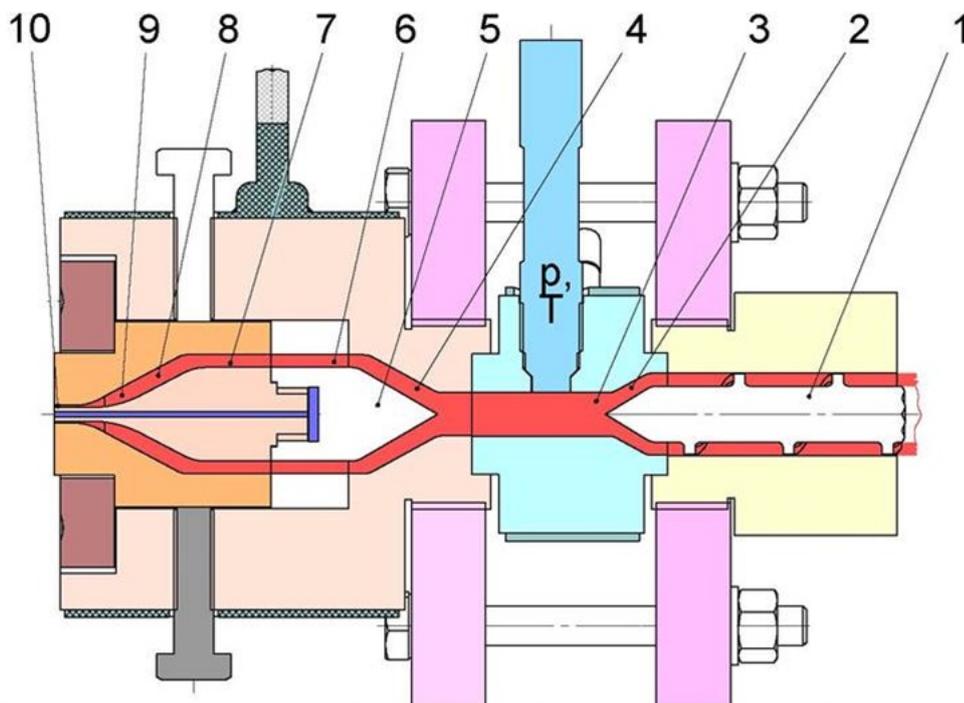
## Zeitgemäße Auslegung von Werkzeugen

Gerhard A. Martin, Kunststoff Prozess Technik Dr.-Ing. Martin GmbH,  
Nürnberg  
Andreas Sobotta, INO - Ingenieurbüro für Numerische  
Optimierungsmethoden, Aachen

Bei der Auslegung von Werkzeugen für die Extrusion von Rohren und Schläuchen ist zunächst die Frage nach dem Werkzeugtyp und der Grundausslegung zu stellen. Der erste Entwurf kann immer mit analytischen Rechenmethoden erfolgen. Danach wird man die Auslegung verfeinern und numerische Rechenmethoden einsetzen. Zielsetzung der Berechnung kann eine gute Abreinigung der Wandungen (Putzströmung), ein geringer oder hoher Druckverlust oder eine möglichst spannungsarme Schmelze (Relaxation) sein. Zusätzlich kann man die Schmelze abkühlen oder mehrschichtig extrudieren. Je nach Anwendung in der Medizintechnik oder im Massenmarkt sowie für die Vielzahl der Polymere ergeben sich zusätzliche Anforderungen.

### Grundausslegung

Bei der Grundausslegung kann man den Fließkanal in Abschnitte aufteilen, [Bild 1](#).



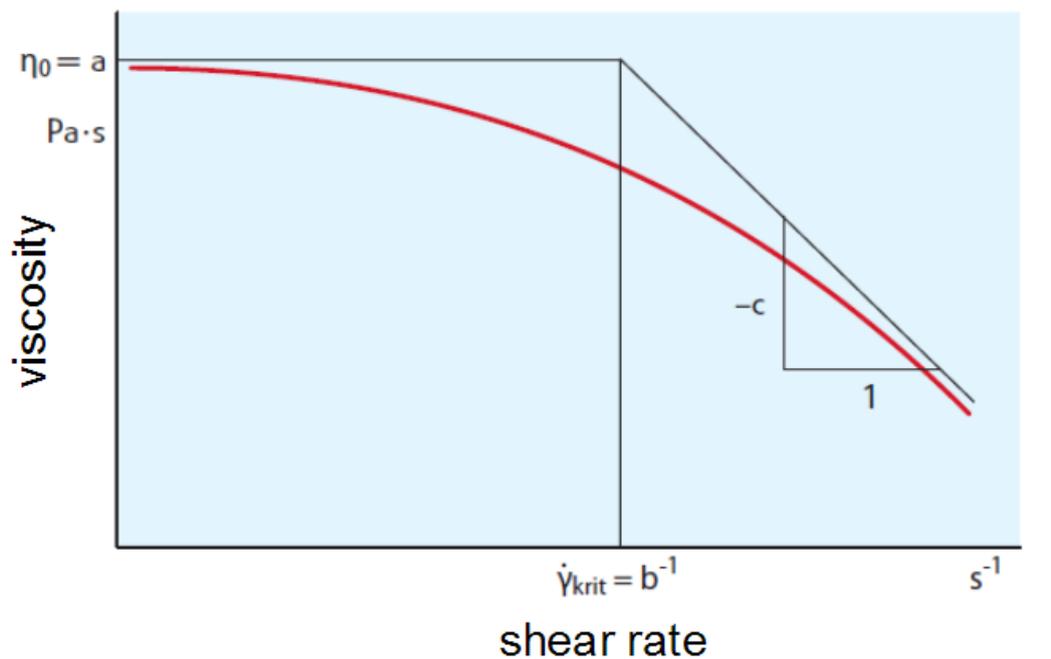
Extruder (1) mit Abreinigung der Schneckenspitze (2), Messstrecke für Druck und Temperatur (3), Fließkanal (4) um die Dornspitze (5), Stegdornhalter (6) und Fließkanal zum Verschweißen der Fließnähte (7), Relaxationszone (8), Übergangsbereich mit hoher Dehnströmung (9) und Bügelzone (10)

**Bild 1:** Prinzipbild eines Stegdornhalterwerkzeuges

Man erhält einfach zu berechnende Fließkanäle wie einen sich öffnenden Ringspalt an der Schneckenspitze, einen Vollstrang in der Messstrecke, einen sich verjüngenden Ringspalt an Dornspitze und ein Rohr im Stegdornbereich. Diese „einfachen“ Fließkanäle kann man von Hand oder besser mit einem geeigneten Computerprogramm berechnen. Wenn man sich der Mühe einer analytischen Auslegung unterzieht, erhält man eine Grundauslegung des Werkzeuges, in der die wesentlichen Abmessungen richtig dimensioniert sind. Einzelne Zonen wie die Dornspitze oder die Stege des Dornhalters lassen sich nicht exakt „von Hand“ dimensionieren. Radien und Übergänge wird der „gute“ Konstrukteur mit Erfahrung auslegen. Leider gibt es kein einfaches Kriterium zur Beurteilung komplexer Geometrien. Hierzu ist eine aufwendigere Berechnung wie beispielsweise mit der Finite Volumen Methode notwendig. Heute sind genügend Rechenprogramme auf dem Markt, die eine verfeinerte Berechnung ermöglichen.

## Fließkurven

Für die Berechnung ist die Kenntnis des Fließverhaltens des zu extrudierenden Polymers notwendig. Hierzu nimmt man Fließkurven mit einem Hochdruckkapillarrheometer auf, die den Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der Schergeschwindigkeit beschreiben. Die Fließkurven müssen für jedes Polymer bekannt sein. In vielen Fällen stellt der Materiallieferant die Kurven zur Verfügung, in anderen Fällen muss man selber messen lassen. Aus der Fließkurve gewinnt man die Viskositätskurve, [Bild 2](#).



© Kunststoffe

**Bild 2** : Viskositätskurve einer Kunststoffschmelze approximiert mit dem Carreau-Ansatz

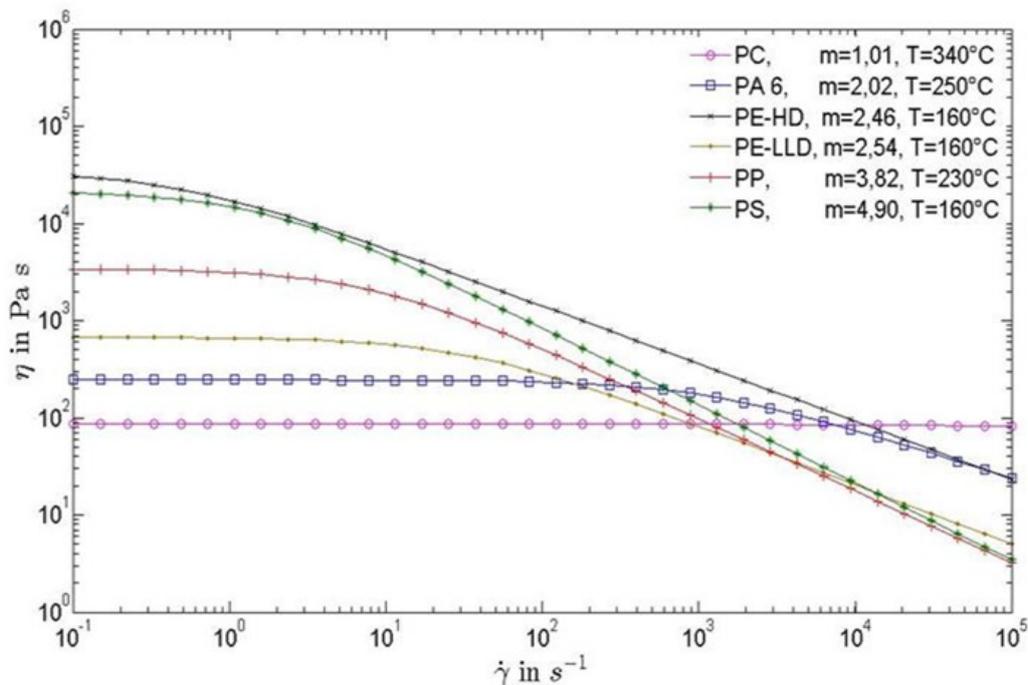
Bei niedrigen Schergeschwindigkeiten ist die Viskosität am höchsten. Die Verknüpfungen zwischen den Molekülen erfolgen (fast) vollständig. Mit zunehmender Schergeschwindigkeit werden die Makromoleküle (reversibel) gestreckt und die Verknüpfungen gleiten aufeinander ab. Die Viskosität nimmt ab.

Die gemessene Fließkurve versucht man mathematisch zu beschreiben. Im Laufe der Zeit wurden viele Fließgesetze entwickelt. Heute arbeitet man gerne mit dem Carreau-Ansatz.

$$\eta = \frac{a}{(1 + b * \dot{\gamma})^c}$$

Der Wert a beschreibt die Viskosität bei niedriger Schergeschwindigkeit (Nullviskosität), der Wert -c die Steigung bei hoher Schergeschwindigkeit. Den Schnittpunkt der Asymptoten beider Kurvenabschnitte bezeichnet man als „kritische“ Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_{krit}$ , bei der der Übergang vom Newton'schen Fließverhalten mit konstanter Viskosität zum strukturviskosen Fließverhalten mit abnehmender Viskosität erfolgt.

Jeder Kunststoff hat ein unterschiedliches Fließverhalten. In Bild 3 ist das Fließverhalten von Polymeren mit deutlich unterschiedlicher Strukturviskosität dargestellt. Dies zeigt die Breite der Anwendungen und warum es erforderlich ist, Werkzeuge jeweils für die zum Einsatz kommenden Polymere auszulegen.



**Bild 3:** Fließkurven von Polymeren unterschiedlicher Strukturviskosität

## Putzströmung

Wesentlich sind in fast allen Anwendungen ein guter (schneller) Farbwechsel und bei thermisch empfindlichen Polymeren wie PVC kurze Verweilzeiten. Hierzu bestimmt man die Wandschergeschwindigkeiten und die Wandschubspannungen im Fließkanal. Ziel sind Wandschubspannungen, bei denen die Moleküle von der Wand abgelöst werden. Hierzu wählt man Erfahrungswerte, wie sie z.B. von Compuplast /1/ angegeben werden. Aus der Produktionspraxis kennt man die Bedingungen, bei denen ein Werkzeug eine lange Standzeit hat oder sich Ablagerungen (Verbrennungen) bilden. Hieraus rechnet man die Fließbedingungen nach und erhält Ausgangswerte für die Auslegung.

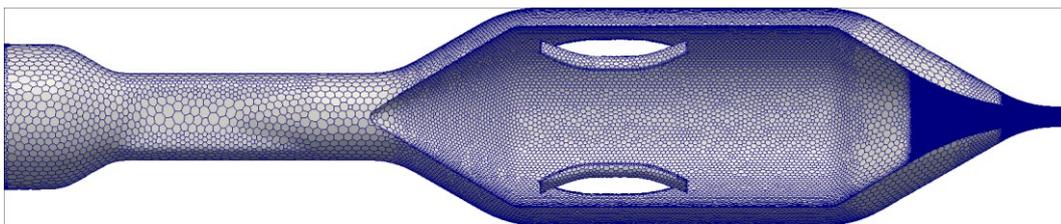
Üblich ist eine Bandbreite für den Durchsatz einer Extrusionslinie. Man fährt nicht nur Maximalleistung. Je nach Polymer und Aufgabenstellung werden Leistungen von 1 zu 3 bis 1 zu 5 angestrebt. Entsprechend wird die Schergeschwindigkeit an der Wand steigen. Für ein hochviskoses Polymer kann man die Schergeschwindigkeit von 8 bis 20 s<sup>-1</sup> und für ein niedrig viskoses Polymer 80 bis 200 s<sup>-1</sup> wählen. Kriterium ist die Abreinigung der Wand, der Druckverlust und die Temperaturerhöhung.

## Relaxation

Im Werkzeug kann man eine Relaxationszone vorsehen, in der sich die Moleküle aus dem gestreckten in den verknüpften Zustand zurückbilden. Es gibt Anwendungen, bei denen beim Eintritt in die Bügelzone ein weitgehend einheitlicher Spannungs- und Orientierungszustand vorliegen soll. In der Relaxationszone muss die kritische Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_{krit}$  unterschritten werden, damit die Moleküle sich wieder verschlaufen können. Die notwendige Relaxationszeit ist näherungsweise der Kehrwert der kritischen Schergeschwindigkeit. Relaxationszonen in Werkzeugen sind bekannt. Die Zusammenhänge sind in /2/ beschrieben.

## 3D-Finite Volumen Methode

Eine rheologisch präzise Auslegung der Extrusionswerkzeuge benötigt detaillierte Informationen über die Strömung im Kanal. Diese können mit Hilfe einer 3D-Strömungssimulationen gewonnen werden. Zur Abbildung der Strömungsvorgänge wird das Berechnungsgebiet, wie in [Bild 4](#) dargestellt, in eine große Zahl von vielfältigen Elementen unterteilt. Damit sind auch komplizierteste dreidimensionale Fließkanalgeometrien berechenbar.

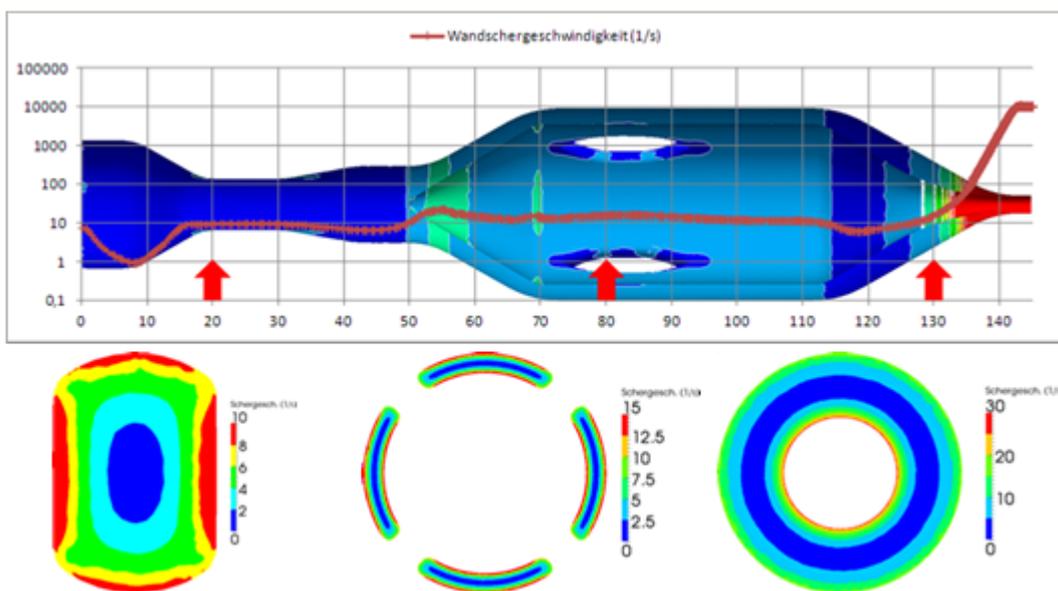


**Bild 4:** 3D-Netzstruktur

Es entsteht ein 3D-Raumraster, innerhalb dessen die Berechnung in Abhängigkeit von den Rand- und Anfangsbedingungen durchgeführt wird. Randbedingungen beschreiben die örtliche Ausdehnung des zu modellierenden Systems und des Verhaltens der Schmelze am Gitterrand. Anfangsbedingungen bestimmen die Startwerte der veränderlichen Größen.

Das Gitter muss die Geometrie abbilden. Kritische Bereiche wie beispielsweise die Anbindung der Stege (Radien) oder die Bügelzone mit geringer Spaltweite müssen enger vernetzt werden. Eine übertrieben feine Vernetzung des gesamten Fließkanals verlängert die Rechenzeiten beträchtlich.

### Berechnung der Schergeschwindigkeiten (1/s) an der Wand



**Bild 5:** Schergeschwindigkeiten im Rohrwerkzeug

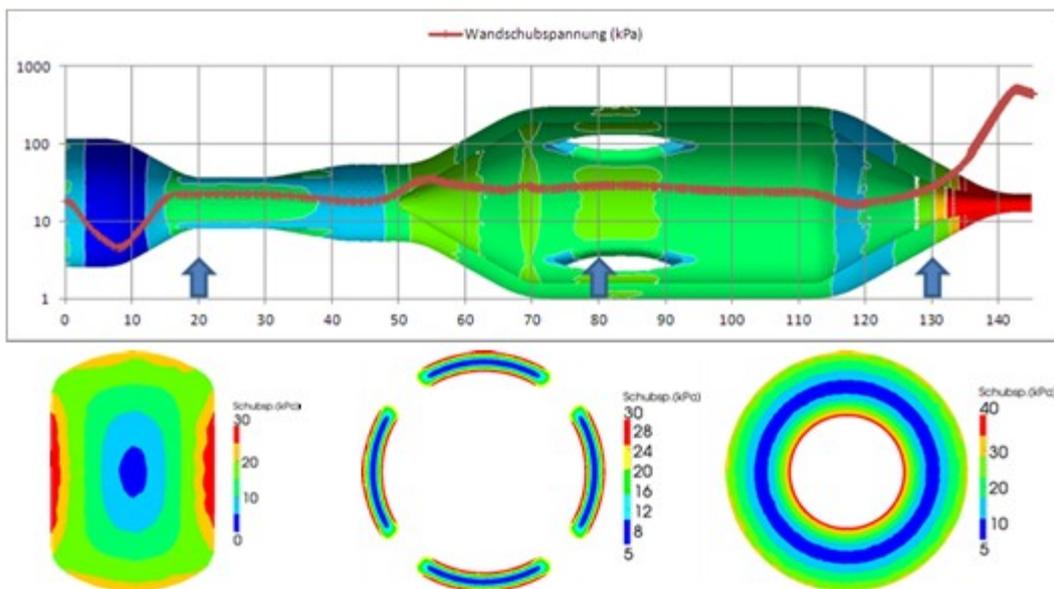
Aus dem vorgegebenen Durchsatz errechnet man mit Hilfe des Fließgesetzes die Schergeschwindigkeit im Fließkanal. Für die angenommene Kanalgeometrie ergibt sich für jedes Polymer eine andere Schergeschwindigkeit. Man wählt die Spaltweiten so, dass die angestrebten / vorgewählten Schergeschwindigkeiten „ergeben“. Es reicht nicht aus, eine repräsentative Schergeschwindigkeit oder Viskosität anzunehmen. Dies wird aus Bild 2 deutlich. Da die Finite Volumen Methode immer für ein Netzwerk rechnet, ist es wichtig, mit einer „vernünftigen“ Geometrie zu beginnen. Deshalb ist eine analytische Vorauslegung sinnvoll. In einigen Fällen kann man auch das Netzwerk optimieren.

Die Schergeschwindigkeit an der Wand bestimmt das Reinigungsverhalten der Düse. Nur wenn die Schergeschwindigkeiten an der Wand des Fließkanals in der gleichen, vorgewählten Größe vorliegen, werden die Wände überall abgereinigt. Das Ablösen der Moleküle von der Wand erfolgt durch Schubspannungen, die das Produkt von Viskosität und Schergeschwindigkeit sind.

Falsche Spaltweiten, zu kleine Radien, Fließschatten oder Toträume werden durch unterschiedliche Farben in der grafischen Darstellung der Rechenergebnisse sofort angezeigt. Man spricht von einer „Blütenwiese“. Ziel ist es, einen „monochromen“ Fließkanal zu haben. Die Schergeschwindigkeit ist ein sehr empfindlicher Indikator.

Die Temperaturerhöhung steigt mit der Zähigkeit der Schmelze und dem Quadrat der Schergeschwindigkeit. Man strebt Schergeschwindigkeiten an, bei denen die Abreinigung ausreichend ist, die Temperaturerhöhung keine Materialschädigung hervorruft, der Druck (sinnvoll) niedrig ist und die Verweilzeit möglichst kurz ist.

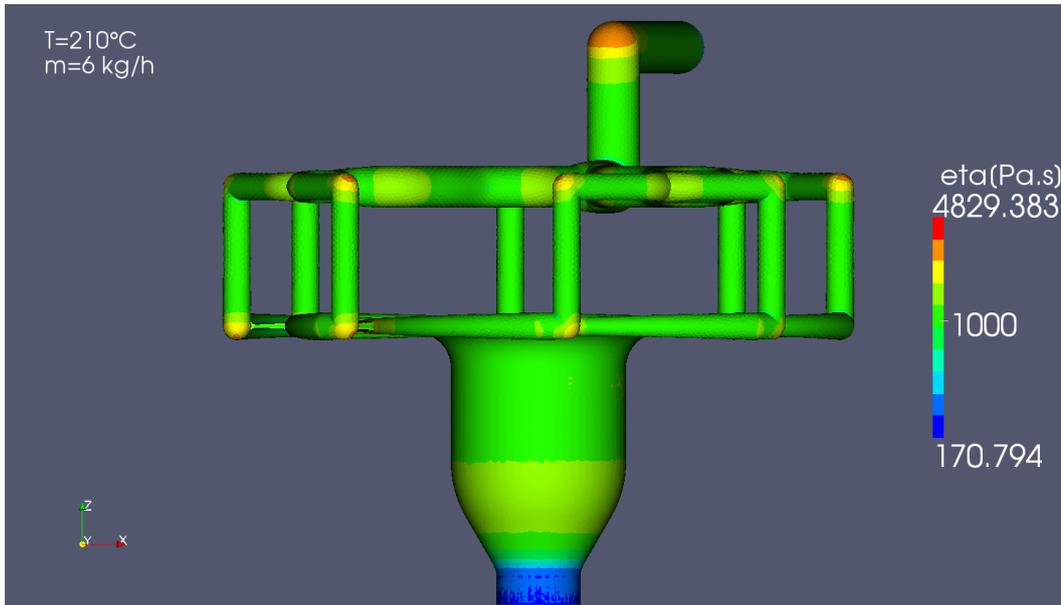
### Berechnung der Schubspannung (kPa) an der Wand



**Bild 6:** Wandschubspannung im Rohrwerkzeug

Die Schubspannung an der Wand ist für die Ablösung der Moleküle von der Wand des Fließkanals maßgebend. Durch die zuvor berechnete Schergeschwindigkeit ist die Schubspannung für jedes Polymer festgelegt. Für die Schubspannungen kann man Mindestwerte und Maximalwerte festlegen. Als ersten Anhaltspunkt kann man eine Schubspannung von 30 kPa als Mindestwert und 140 kPa als Maximalwert annehmen /1/. Unterhalb der Mindestwerte ist die Abreinigung der Wand nicht mehr gegeben, oberhalb des Maximalwertes kann Schmelzebruch auftreten. Aus Bild 2 erkennt man, dass diese Angaben nur Anhaltspunkte sein können. Neben viel Erfahrung ist eine Rückmeldung aus dem Dauerbetrieb notwendig.

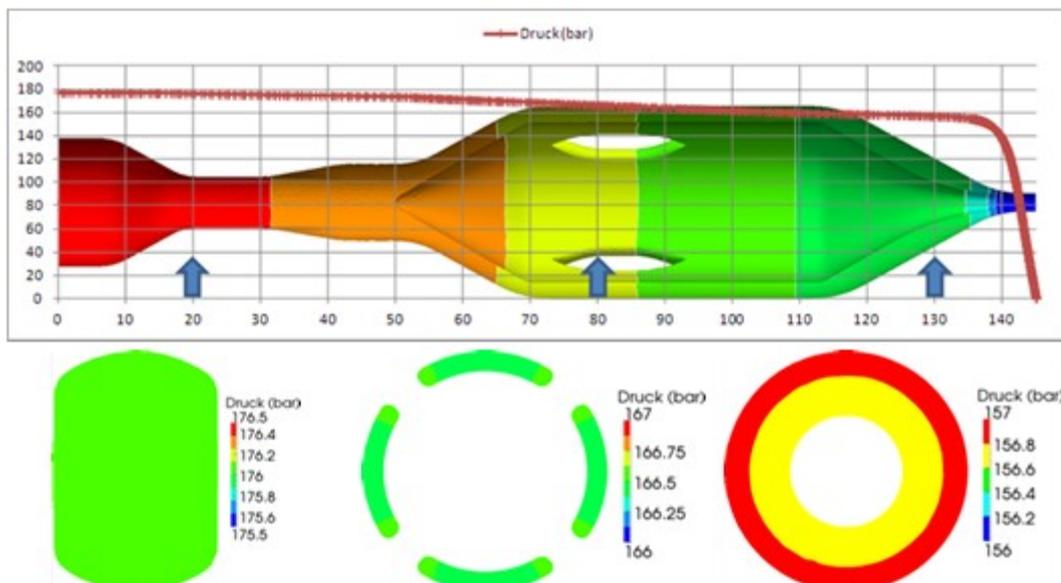
### Darstellung der Viskosität (Pas) im Fließkanal



**Bild 7:** Viskosität im Radial-Wendelverteiler Werkzeug

Aus der Schergeschwindigkeit errechnet sich die (örtliche) Viskosität im Schmelzkanal. Bei der Analyse der Rechenergebnisse ist die andere Farbgebung oft hilfreich bei der Analyse von Verbesserungspotentialen in der Fließkanalgeometrie. Die Darstellung ist für einen Radial-Wendelverteiler.

### Darstellung des Druckes (bar) im Werkzeug

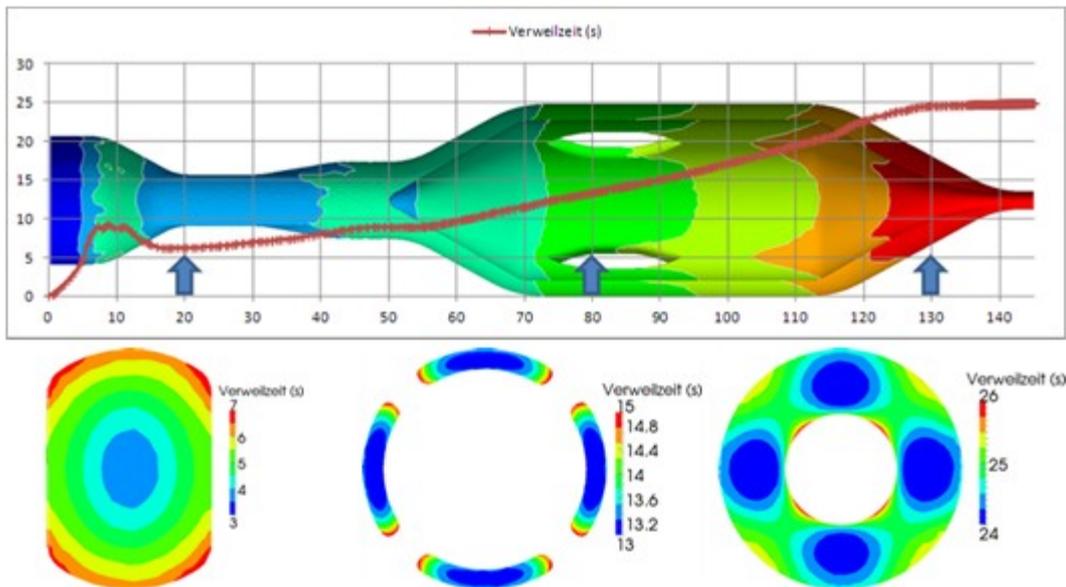


**Bild 8:** Druckverlust im Rohrwerkzeug

Der Druckverlauf im Werkzeug ergibt sich als Ergebnis den gewählten Spaltweiten im Fließkanal. Es wird deutlich, dass bei einer sinnvollen Wahl der Geometrie im Fließkanal

nur ein geringer Druckgradient auftritt. Der maximale und unvermeidbare Druckverlust tritt in der Bügelzone auf, deren Geometrie durch das Extrudat (mit) bestimmt wird. Bei einem gut ausgelegten Werkzeug ist der Druckverlust geringer als man aus Erfahrung erwarten würde, obwohl die Wände gut abgereinigt werden.

### Darstellung der Verweilzeit (s)



**Bild 9** Verweilzeit im Rohrwerkzeug

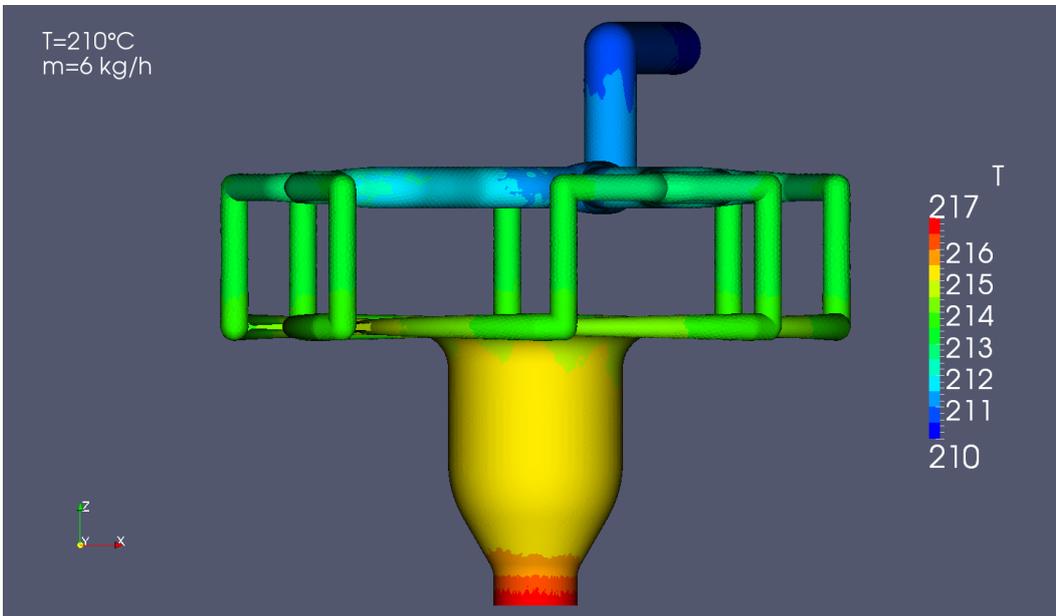
Die Verweilzeit im Werkzeug ist in der Mitte des Fließkanals immer am kürzesten und an der Wand am längsten. Deutlich erkennt man Wandbereiche, in denen Polymer stagniert. Wenn man beispielsweise einen zu kleinen Radius wählt, erhält man örtlich eine längere Verweilzeit. (Dies erkennt und korrigiert man schon bei der Berechnung der Schergeschwindigkeit.)

### Berechnung der Temperaturerhöhung (°C)

Die Schmelztemperatur errechnet sich aus Wärmedissipation. Hier geht auch die Beheizung des Werkzeuges ein. Sinnvoll und üblich ist es, die Werkzeugtemperatur auf die (richtig) gemessene Schmelztemperatur einzustellen. Bei nur geringen Temperaturerhöhungen kann man dann die Wärmeleitung durch die Wand vernachlässigen.

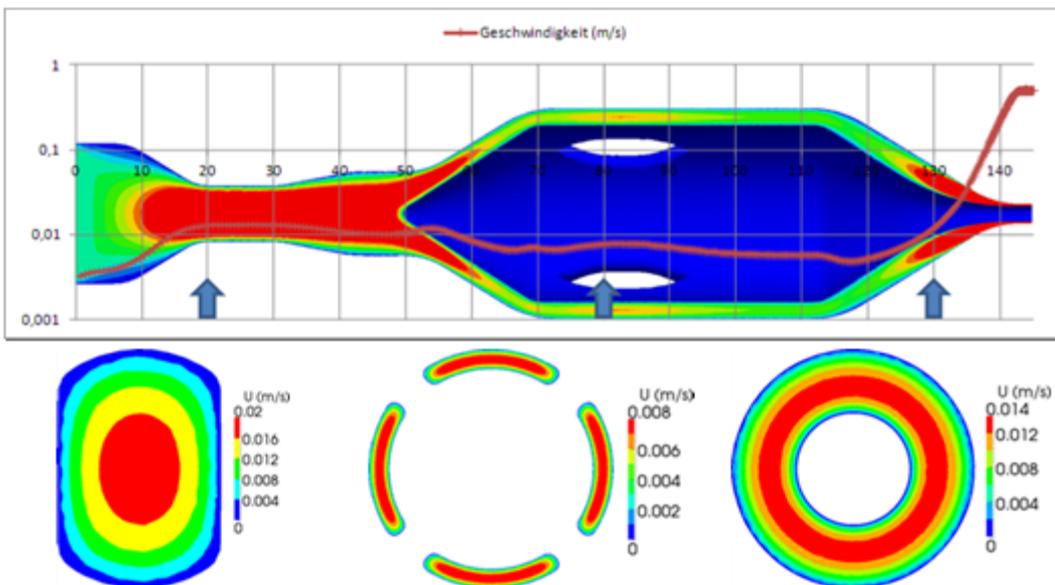
Heute kühlt man die Schmelze oft im Werkzeug ab und erreicht kürzere Kühlstrecken sowie eine bessere Wanddickenverteilung. Diese Kühlvorgänge kann man ebenfalls berechnen.

Kühlt man zu stark, kann das Polymer an der Wand einfrieren. In jedem Fall wird der Fluss deutlich beeinflusst.



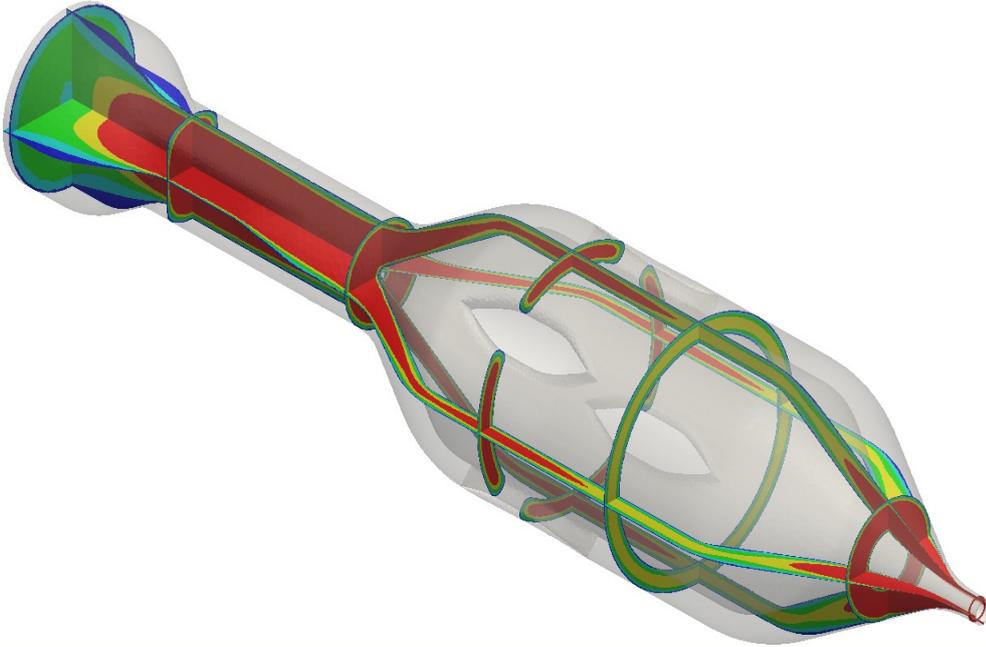
**Bild 10:** Temperaturverteilung im Radial-Wendelverteiler Werkzeug

### Darstellung der Geschwindigkeit im Kanal (m/s)



**Bild 11:** Geschwindigkeitsverteilung im Rohrwerkzeug

Die Geschwindigkeit im Kanal und im Austrittsspalt / Bügelzone gibt letztendlich Auskunft über die Qualität der Auslegung. Bei Rohren ist wegen der Symmetrie dieses Kriterium weniger aussagekräftig.

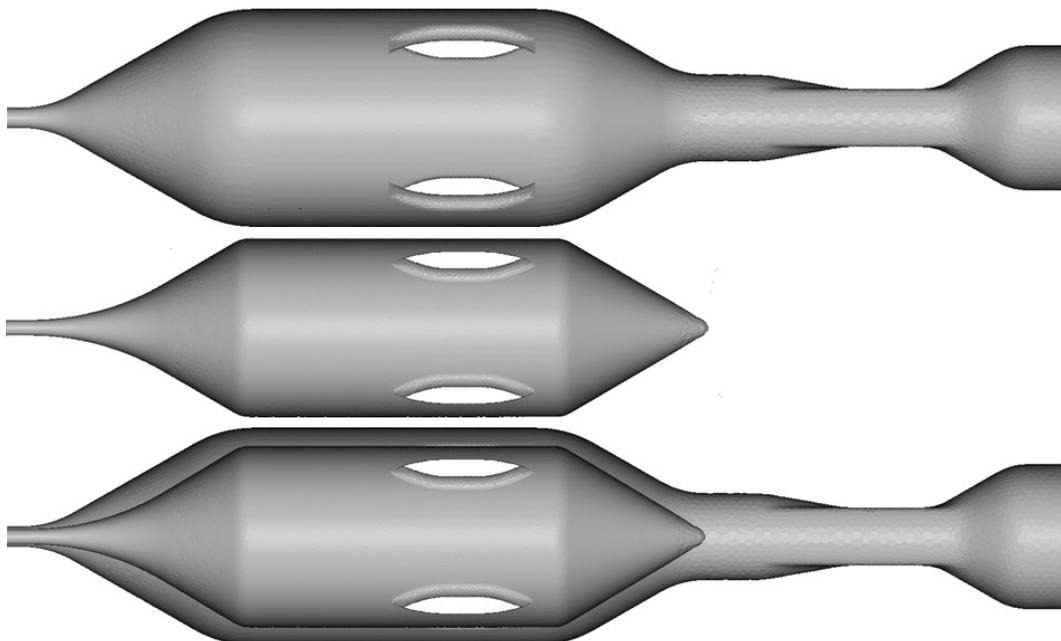


**Bild 12** Geschwindigkeit auf den Schnittebenen

### Darstellung der Fließkanäle

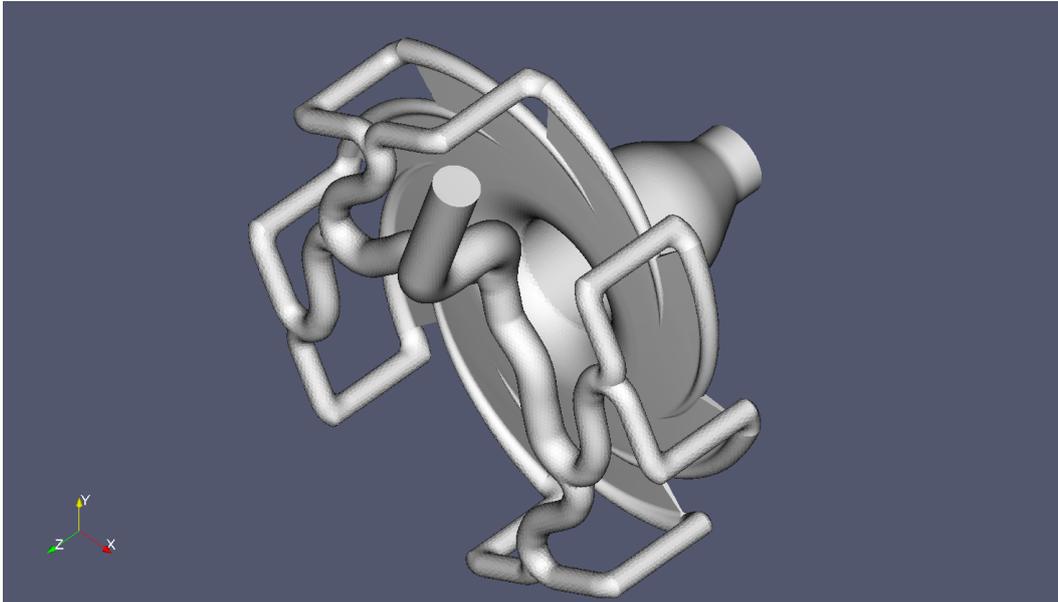
Das Ergebnis der Rechnung ist ein Fließkanal, der als Grundlage für die Fertigung dient. Die Ausgabe der Daten erfolgt CNC-gerecht.

### Kanal-Rohrwerkzeug



**Bild 13** Geschwindigkeit auf den Schnittebenen

## Kanal-Radial Wendelverteiler



**Bild 14** Radial-Wendelverteiler von der Rückseite

### Zusammenfassung

Die Auslegung von Werkzeugen mit numerischen Rechenmethoden hat viele Vorteile. Man erkennt Details, die mit herkömmlichen Auslegungsmethoden nicht deutlich werden. Insbesondere die Schergeschwindigkeit an der Wand des Fließkanals ist ein sensibler Indikator für die Qualität der Auslegung. Farbwechsel, Verweilzeit, Temperaturerhöhung und Druckverlust werden vorteilhaft beeinflusst.

### Literatur

- /1/ Compuplast Extrusion Calculator, Tutorial 2007  
Compuplast International, Inc, CZ 76001 Zlín
- /2/ K. Geiger, G. Martin, A. Sobotta: Relaxationszonen in Werkzeugen,  
Kunststoffe 6/2011, S. 44 -49