

Rheologische Strömungen numerisch betrachtet

A numerical view of rheological flow

Klaus-Wolfram Dreisbach,
Dettingen,
Germany

In den letzten zwei Jahren ist die Leistungsfähigkeit von Computern und Programmen zur Strömungssimulation enorm angestiegen. Immer komplexere Zusammenhänge lassen sich zuverlässig analysieren und können zu Optimierungen bereits am numerischen Modell führen.

Dieser Beitrag soll aufzeigen, welche verwertbaren Ergebnisse mit einem allgemeingültigen 2D- und 3D-Finite-Element-Programm der Strömungsmechanik erzielt werden können. Insbesondere werden die Fähigkeiten im Bereich der nicht-Newton'schen Fluide dargestellt.

1 Grundlagen

Die Strömungsmechanik als klassische Ingenieurdisziplin ist ein sehr weites Feld. Sie reicht von laminaren zu turbulenten Strömungen, kann isotherm oder temperaturabhängig sein und das bei newton'schen oder nichtnewton'schen Viskositäten in 2D- oder 3D-Geometrien. Weitere Phänomene wie Reaktionskinetik, Überschall-Druckwellen, die Kompressibilität oder unterschiedliche Phasen und Phasenübergänge von Medien kommen hinzu.

Aus dieser Bandbreite wird deutlich, wie komplex die Mathematik sein muß, um möglichst viele Anwendungen abzudecken.

Mit dem hier angesprochenen Programm sind die Massen-, Momenten- und Energiegleichungen nach dem

Navier-Stokes-Ansatz lösbar, wobei die Reibung an der Berandung sowie innerhalb des Fluids mit berücksichtigt wird.

Für die nicht-newton'schen Medien werden als Standard-gesetze Power-Law, Bingham, Carreau sowie allgemeine, vom Anwender

definierbare Relationen mit Viskositätsabhängigkeiten von der Scherrate, Temperatur, Spezies-Konzentration und Zeit im Programm angeboten.

In the last two years the efficiency of computers and programs for simulating flow has increased enormously. More and more complex relationships can be reliably analysed and can lead to optimisation already on the numeric model.

The purpose of this paper is to demonstrate what useful results can be obtained with a generally applicable 2D and 3D finite element program for flow mechanics, with special reference to non-Newtonian fluids.

1 Basic principles

Flow mechanics, as a classic engineering discipline, is a very wide field, ranging from laminar to turbulent flow. It can be isothermal or temperature-dependent, at Newtonian or non-Newtonian viscosities in 2D or 3D geometries. Further phenomena, like reaction kinetics, supersonic pressure waves, compressibility or different phases and phase transitions of media have to be added. It is clear, therefore, how complex the mathematics necessary to cover as many different applications as possible must be.

The program under discussion may be used to solve mass, moment and energy equations in accordance with the Navier-Stokes formula, friction near the edge as well as inside the fluid being taken into account.

For non-Newtonian media, the program offers as standard laws the power law, Bingham, Carreau as well as general relations which can be specified by the user, with viscosity dependencies on shear rate, temperature, species concentration and time.

The finite element equation can deal with geometries of any complexity, boundary conditions can be relatively easily formulated and a high degree of mathematical accuracy is achieved. This affects not only the quality of the results but also - and this is particularly important - the user's acceptance.

Comprehensive possibilities for evaluating the huge amount of data produced are offered by the post-processor. Not only can velocity, pressure and temperature patterns be represented graphically, in colour, but also the distribution of viscosity and turbulence intensity. Phenomena which are often hidden can thus be made visible.

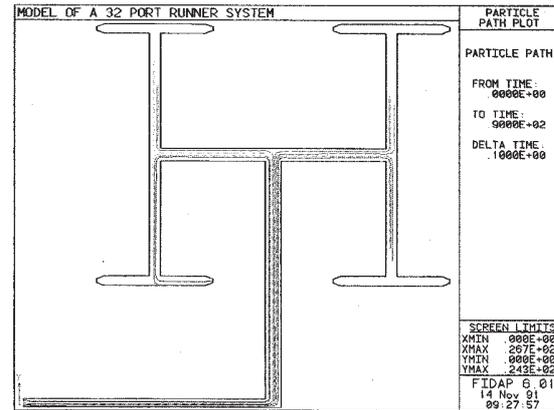
Abb. 1:
Druckverteilung im
Extrusionswerkzeug in fünf
Ebenen

Fig. 1:
Pressure distribution in the
extruder die in five planes



Abb. 4:
Darstellung der Wegstrecke einzelner Fluid-Partikel innerhalb vorgegebener Zeit

Fig. 5:
Distribution of the shear rate in the runner system



In dem hier verwendeten Werkstoff ist die Viskosität sowohl von der Temperatur als auch von der Verformungsrate abhängig. Empirisch ermittelte Daten wurden zu einer Kurve eingegeben, siehe Gleichung (5), wobei a_1, \dots, a_5 Konstanten sind. Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs wurden als konstant angenommen.

Mit dem Radius am Eintritt von 0,003 m, einer Eintrittsgeschwindigkeit von 0,15 m/sec und einer Eintrittstemperatur von 160 °C lassen sich die dimensionslosen Zahlen wie folgt ermitteln:

$$Re = 8,11 \times 10^{-4}$$

$$Pe = 1,13 \times 10^4$$

$$Br = 31,48$$

Aus diesen Werten läßt sich erkennen, daß die inneren Kräfte praktisch keine Rolle für die Transport- und Momentengleichung spielen, während der Wärmetransport überwiegend durch Advektion statt durch Diffusion erfolgt. Die Aufheizung durch Scherung ist dominant und beschreibt ein typisches Verhalten von Kunststoff-Schmelzen.

Die Temperatur in Abb. 3 zeigt, daß die Rechnung die Wärme-Erzeugung aufgrund der Wandreibung wiedergibt.

Das zeitliche Verhalten einzelner Fluid-Partikel ist in Abb. 4 zu sehen. Auffallend ist, daß eine Spritzgießform bereits vom flüssigen Kunststoff erreicht wurde, während zur selben Zeit in dem Strang nach rechts oben noch nicht einmal der letzte Abzweig gefüllt wird. Dies rührt insbesondere von den Änderungen der Viskosität: für die Form links unten „schert“ das Fluid der Wand entlang und wird dadurch immer schneller, während die Teilchen nach rechts oben mehrfach von einer gegenüberliegenden, relativ kalten Wand umgelenkt werden müssen.

Besonders interessant ist die grafische Darstellung der Scherrate (Abb. 5). Eine derartige Verteilung ist ein Nebenprodukt der Simulation, welches mit Versuchsmethoden nicht ohne weiteres erzielt werden kann.

Abb. 5:
Verteilung der Scherrate im Anguß-Kanalsystem

Fig. 4:
Representation of the path taken by individual fluid particles within a specified period of time

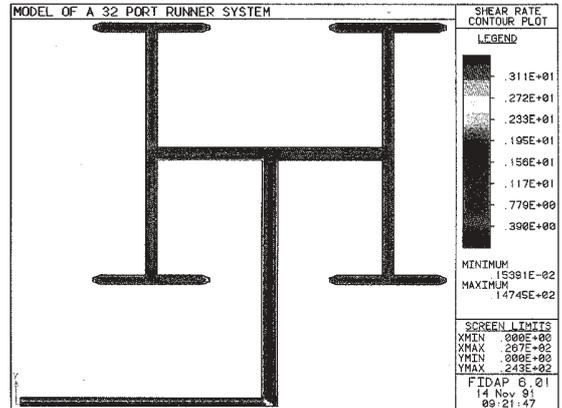


Fig. 4 shows the behaviour of individual fluid particles in relation to time. Here, it is interesting to note that the polymer melt reached one injection mould, whilst at the same point in time not even the last runner had been filled. This is due in particular to changes in viscosity. For the mould at bottom left, the fluid "shears" along the wall and thus becomes increasingly faster, whilst the particles to the top right have to be repeatedly diverted from the opposite, relatively cool wall.

The graphic representation of the shear rate is especially interesting. Such a distribution is a by-product of simulation, which cannot be easily achieved by means of experimental methods. This problem can be solved in two ways:

- One calculates the throughput rates and changes the cross-sections until the melt stream is exactly the same size at all the gates leading into the mould cavity.
- One ensures that the mould is heated evenly, so that uniform melt viscosity is achieved.

4 Summary

We have demonstrated that simple 2D simulations as well as 3D analysis of polymer melt streams with a numeric program are possible. Data which are extremely difficult or impossible to obtain, e.g. shear rate distribution, can be determined with a good computer program. Similarly, variants for different materials or changes in geometry can be evaluated relatively quickly.

Complete material data are not always available, so that some work needs to be done in this area. Accordingly, material laws require further development. 

FLIESSVERHALTEN VON STOFFEN UND STOFFGEMISCHEN

Rheologie und Rheometrie, die Erkenntnisse zum Fließverhalten von Stoffen und Stoffgemischen und die entsprechende Meßtechnik, haben sich stürmisch entwickelt. Dieses Buch macht den Umfang deutlich, informiert in zehn umfassenden Hauptkapiteln über das weite Gebiet, erlaubt den direkten Vergleich unterschiedlich aufgebauten Stoffe und gibt Antwort auf die – für die industrielle Produktion besonders wichtige – Frage: Ist die eigene Technik auf dem neuesten Stand?

Herausgegeben von Werner-Michael Kulicke
unter Mitwirkung von zehn weiteren Fachautoren,

487 Seiten, gebunden, 260,- DM



Rheology and Rheometry – the knowledge of flow properties of material and mixtures of material and their measuring techniques – have

developed rapidly. In ten chapters, the book provides comprehensive information on this subject by comparing directly different materials and offering answers to questions particularly important for industrial production such as:

Is your technology really up-to-date? Does it meet modern requirements?

Published by Werner-Michael Kulicke
in collaboration with ten other experts.

487 pages, bound, 260,- DM

VINCENTZ

Vincenz Buchversand

Schiffgraben 41-43 · Postfach 6247 · D-3000 Hannover 1

Telefon (0511) 9909824 · Telex 923846 · Telefax (0511) 9909829

Die Lösung für dieses Problem ist mit der Berechnung auf zwei Arten möglich:

- man errechnet die Durchflußraten und verändert die Querschnitte, bis der Massenstrom an allen Enden vor den eigentlichen Formen gleich groß ist.
- mit einer gezielten Heizung der Form wird die Viskosität an allen Stellen auf einheitliche Werte gebracht.

4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß sowohl einfache 2-D-Simulationen als auch die 3-D-Analyse von Kunststoff-Strömungen mit einem numerischen Programm möglich sind.

Erkenntnisse, die versuchstechnisch nicht oder nur äußerst schwierig zu erzielen sind (z.B. die Verteilung der Scherrate), können mit einem guten Rechenprogramm ermittelt werden. Ebenso können Varianten für unterschiedliche Werkstoffe oder Geometrie-Änderungen relativ schnell bewertet werden.

Bei den Werkstoffdaten besteht noch ein gewisser Entwicklungsbedarf- sie stehen nicht immer vollständig zur Verfügung. Dementsprechend sind auch die Materialgesetze noch weiter entwicklungsbedürftig, aber im Ergebnis können nicht nur tiefere Einblicke in die komplexen Zusammenhänge nicht-Newtonscher Fluide gewährt, sondern auch praktische Lösungen zur Beseitigung von Problemstellen erarbeitet werden.

Rh

Verwendete Symbole:

Explanation of symbols used:

u	= Geschwindigkeitsvektor/velocity vector
∇	= Gradient von Vektor u /gradient of vector u
p	= Druck/pressure
∇p	= Gradient des Drucks/pressure gradient
Pe	= Peclet-Zahl/Peclet number
T	= Temperatur/temperature
∇^2	= Gradient (Tensor)/gradient (tensor)
Φ	= Scherrate (Tensor)/shear rate (tensor)
μ	= dynamische Viskosität/dynamic viscosity
K	= Konstante (Skalierungsfaktor)/constant (scaling factor)
A_1, A_2	= Koeff. für die T-Abhängigkeit/coefficient for T dependence
D, D_0	= Scherrate (Betrag)/shear rate (amount)
POW	= Exp. zur Scherrate/exponent to shear rate
n	= nichtlinearer Werkstoffexponent/non-linear material exponent
$A_3 \ln D$	= Abhängigkeit von der Scherrate/dependence on shear rate
$A_4 T$	= Abhängigkeit von der Temperatur/dependence on shear rate
S	= Verformungs-Tensor/deformation tensor
τ	= Spannungs-Tensor/stress tensor

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website

<http://www.appliedrheology.org>

Rheology 92
June/Juni 1992

117

This is an extract of the complete reprint-pdf, available at the Applied Rheology website

<http://www.appliedrheology.org>