

# Phänomene bei nicht-newtonschen Strömen

Anna Wieprecht

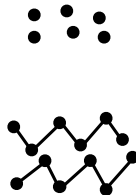
26.04.2018

- 1 Einführung
- 2 Effekte auf Grund von Normalspannungen
  - Weissenberg-Effekt
  - Barus-Effekt
- 3 Effekte auf Grund von Dehnaviskosität
  - Siphon-Effekt
  - Widerstandsverringern
- 4 Kontraktionsströme
- 5 Instabilitäten
  - Taylor-Problem
  - Weitere Gründe für Instabilitäten

# Traditionelle newtonsche Strömungslehre

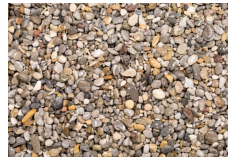
- Beeinflusst durch die Wechselwirkung von viskosen Kräften und Trägheitskräften.
- Dort wo freie Oberflächen vorhanden sind auch von Oberflächenspannung.
- Im täglichen Leben gibt es viele Beispiele von Fluiden deren komplexe Mikrostruktur viele verschiedene Verhalten hervorruft.
- Fluide verhalten sich oft nicht gemäß der newtonschen Strömungslehre.  
→ Interessante und unerwartete Strömungsmuster sowie komplexe Dynamik.

- Newtonsche Fluide sind Fluide, deren einzelne Partikel so klein sind, dass ihre Dynamik keinen wesentlichen Einfluss auf die Dynamik des Fluids hat.
- Newtonsches Modell unzureichend für Fluide deren Mikrostruktur so ist, dass sie einen deutlich größeren Maßstab haben als den atomaren.  
→ Nicht-newtonsche Fluide.



# Beispiele für nicht-newtonsche Fluide

- Suspensionen wie Beton und Teig, Schäume und Flüssigkristalle.
- Granulare Medien wie Sand, Kies und Kohle.
- Strömungen von Materialien die gewöhnlich als fest angesehen werden wie z.B. fließende Gletscher.



Teig: [www.kuechengoetter.de/rezepte/vanille-ruehrteig-73222](http://www.kuechengoetter.de/rezepte/vanille-ruehrteig-73222)

Schaum: [www.scienceticker.info/category/technik/page/4/](http://www.scienceticker.info/category/technik/page/4/)

Kies: [www.andreasthaler.de/sand-kies-splittarten/mittelkies-8-16-32-mm.html](http://www.andreasthaler.de/sand-kies-splittarten/mittelkies-8-16-32-mm.html)

Gletscher: [nn.wikipedia.org/wiki/Johannisberg\\_i\\_Hohe\\_Tauern](http://nn.wikipedia.org/wiki/Johannisberg_i_Hohe_Tauern)

- Polymere Fluide sind die am meisten erforschte Klasse nicht-newtonscher Fluide.
- Diese Klasse wird im Weiteren betrachtet.
- Dazu gehören Farben, Maschinenöl mit polymeren Zusätzen und viele biologische Fluide wie z.B. Eiweiß und Blut.



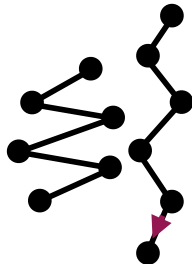
Farbe: [www.zum-einrichten.de/welche-farbe-eignet-sich-fuer-welchen-raum/](http://www.zum-einrichten.de/welche-farbe-eignet-sich-fuer-welchen-raum/)

Öl: [de.fotolia.com/tag/maschinenol](http://de.fotolia.com/tag/maschinenol)

Blut: [www.rotekreuz.at/news/datum/2012/10/03/universal-blutgruppe-null-negativ/](http://www.rotekreuz.at/news/datum/2012/10/03/universal-blutgruppe-null-negativ/)

Eiweiß: [www.fitnessletter.de/kalorien/eiklar-eiweiss/](http://www.fitnessletter.de/kalorien/eiklar-eiweiss/)

- Grundlegende Eigenschaft polymerer Fluide: Vorhandensein von langkettigen Molekülen.
- Kettenmoleküle werden, wegen der Strömungswiderstände die durch umgebende Fluide auf sie ausgeübt werden, in Bewegung ausgestreckt.
- Die natürliche Tendenz des Moleküls ist es, sich aus der gestreckten Anordnung wieder zusammenzuziehen.
- Dies erzeugt elastische Kraft, die zum makroskopischen Spannungstensor beiträgt.
- Der Makroskopische Spannungstensor repräsentiert die Kraft, die das Fluid entwickelt, wenn es sich deformiert.



Links: Molekül  
in Ruhelage  
Rechts: Mo-  
lekül in Bewe-  
gung

## Effekte auf Grund von Normalspannungen

- Newtonsches Fluid: Bei Scherung entwickelt sich Reibungskraft  $\rightarrow$  Viskosität.
- Scherung: Verformung z.B. vom Rechteck zum Parallelogramm.
- Polymere Fluide: Zusätzliche Anpassung der Polymermoleküle in Fließrichtung.
- Folge: Spannkraft in Fließrichtung  $\rightarrow$  Normalspannung.



Scherung bei Fluiden: Ströme bzw. Moleküle verschieben sich gegeneinander.

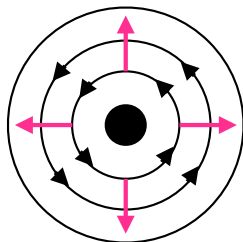
# Weissenberg-Effekt

Im Experiment:

- Rotierender Stab wird in ein Gefäß mit Flüssigkeit gehalten.

Newtonsche Flüssigkeiten:

- Rotierende Bewegung erzeugt Zentrifugalkraft die die Flüssigkeit nach außen drückt.
- Die freie Oberfläche formt eine Senke um den Stab.



## Polymere Fluide:

- Normalspannung verursacht eine Spannung entlang der konzentrischen Stromlinien.
- Diese erzeugt eine Kraft in Richtung des Stabs die das Fluid nach innen drücken.
- Die freie Oberfläche steigt an und das Fluid klettert den Stab hoch.

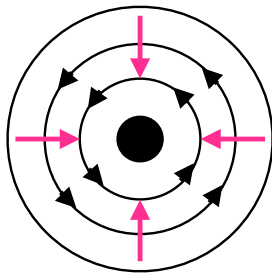


Abb.: [www.youtube.com/watch?v=npZzlgKjs0I](http://www.youtube.com/watch?v=npZzlgKjs0I)

# Barus-Effekt

Beim Austritt aus einem Rohr:

- Durchmesser des freien Strahls außerhalb des Rohrs weicht vom Rohrdurchmesser ab.



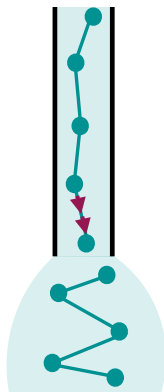
Newtonsche Flüssigkeiten:

- Die Änderung hängt von der Reynolds-Zahl ab.
- Reynolds-Zahl kann als das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften verstanden werden. Sie ist dimensionslos.
- Niedrige Reynolds-Zahl: geringe Vergrößerung des Strahldurchmessers.
- Bei starken Trägheitseffekten schrumpft der Strahldurchmesser.

Abb.: [m.simplyscience.ch/kids-experimente-luft-wasser/articles/laesst-sich-ein-wasserstrahl-verbiegen.htm](http://m.simplyscience.ch/kids-experimente-luft-wasser/articles/laesst-sich-ein-wasserstrahl-verbiegen.htm)

## Polymere Fluide:

- Neigen zu starker Vergrößerung des Durchmessers.
- Wieder sind Spannungen entlang der Stromlinien Grund für den Effekt.
- Diese werden durch Scherbewegungen im Inneren des Rohrs erzeugt.
- Scherung tritt auf, da die lokale Geschwindigkeit am Rand des Rohrs gegen 0 geht.
- Beim Austritt aus dem Rohr wird die Spannung befreit.
- Folge: Der Strahl verkleinert sich in Längs- und vergrößert sich in Querrichtung.



- Bei großer Trägheit des Fluids kann die Verbreiterung des Strahls auch verspätet einsetzen

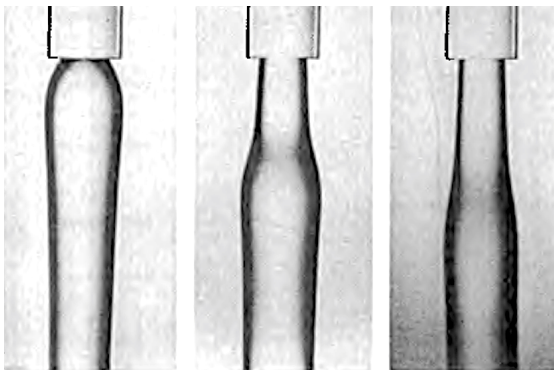


Abb.: Mathematical Analysis of Viscoelastic Flows, Michael Renardy, S.5

## Effekte auf Grund von Dehnviskosität - Siphon-Effekt

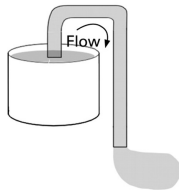
- Polymermoleküle werden ausgedehnt wenn ein polymeres Fluid Dehnung ausgesetzt wird. → Große Federkraft.

Newtonsche Fluide:

- Der Strahl zieht den Rest des Fluids nicht nach, sondern bricht ab.

Polymere Fluide:

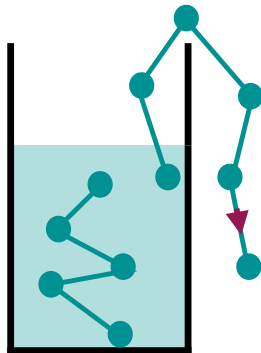
- Durch die Dehnung im fallenden Strahl entsteht Kraft.
- Diese Kraft ist stark genug, um den Rest der Flüssigkeit aus dem Glas zu ziehen.
- Geschieht entgegen der Gravitationskraft.



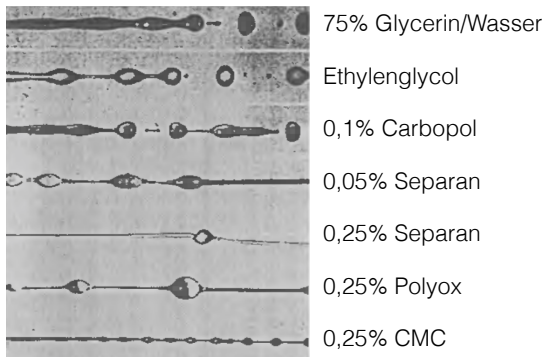
Versuchsaufbau

## Erklärung:

- Strahle und Fasern sind stabil.
- Beobachtbar beim Pizzaessen: Käsefäden.
- Grund für Stabilität: starke Widerstand von Polymeren gegen Dehnung.
- Lokale Dehnung gegen unendlich um Faser durchzubrechen.
- Dehnkraft des Polymers steht dem entgegen und schützt das Polymer davor oder verzögert das Durchbrechen zumindest.
- Beim Versuch: Das gespannte Molekül, das sich schon teilweise im fallenden Strahl befindet, „zieht“ die restlichen Moleküle nach, da auch zwischen den Molekülen Kräfte herrschen.



- Oberflächenspannungsbedingten Abbruch des Strahls.
- Newtonscher Strahl zerfällt in Tröpfchen.
- Beim polymeren Strahl bleiben die Tropfen durch dünne Fäden verbunden. → Wie Perlen auf einer Schnur.
- Polymere haben stabilisierenden Effekt.

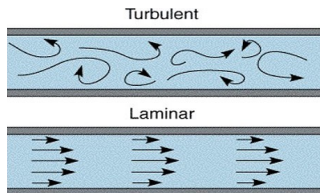


## Anwendung des stabilisierenden Effekts

- Effekt wird genutzt, um durch das Hinzufügen von Zusätzen die Zerstäubung von Flüssigkeiten zu kontrollieren.
- Kontrolle der Tropfengröße ist wichtig, z.B. bei der Spraygenauigkeit in der Luft.
- Findet Anwendung beispielsweise bei Schädlings- oder Brandbekämpfung.

# Widerstandsverringern

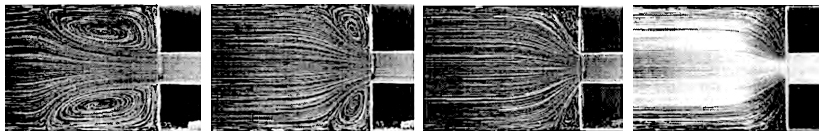
- Wenn Wasser kleine Menge an gelösten Polymeren befördert:  
→ Druck der benötigt wird um eine gegebene Menge Wasser durch ein Rohr zu befördern ist signifikant geringer.
- Effekt schon mögliche bei geringerer Polymerkonzentration als 1 : 1.000.000
- Grund: Polymer unterdrückt Turbulenzen im Wasser.
- Fluss ist dann näher an der optimalen laminaren Strömung.



Phänomen kann nicht vollständig erklärt werden. Der vorherrschende Gedanke ist:

- Der Dehnungswiderstand der Polymere unterdrückt die Wirbel, die Turbulenzen produzieren.
- Uneinigkeit über die Stärke des Effekts bei Widerstandsverringern.
- Numerische Simulationen stützen Hypothese, dass Dehnaviskosität der entscheidende Faktor ist.

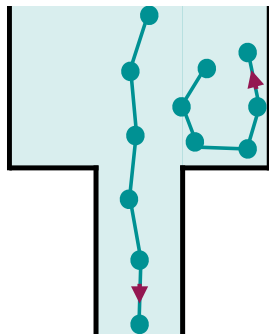
# Kontraktionsströme



- Entstehen bei Übergang von breitem zu engem Rohr.
- Typische Situation bei der Weiterverarbeitung von Stoffen, z.B. bei Abfüllanlagen.
- Großteil des Fluids geht in die Öffnung des engen Rohrs.
- In den Ecken entstehen ständig umlaufende Wirbel.
- Linkes Bild: Stokes-Strömung.
- Durch die Trägheit werden die Wirbel kleiner.
- Elastizität des Fluids vergrößert die Wirbel.
- Annahme: Fluid muss schneller werden um in das enge Rohr zu gelangen.

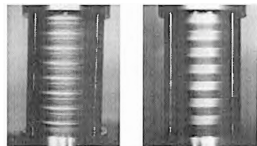
Abb.: Mathematical Analysis of Viscoelastic Flows, Michael Renardy, S.7

- Diese Beschleunigung führt bei trägheitsdominierten Strömen zum Bernoulli Saugeffekt.
  - Bernoulli-Effekt: Bei schnellerer Strömung verringert sich der Druck.
- Dabei wird Fluid aus den Ecken in das Rohr gezogen.  
→ Verkleinerung der Wirbel.
- Andererseits verursacht die Beschleunigung entlang der Stromlinien bei elastischen Fluiden eine elastische Spannung entlang dieser Linien.
- Die Spannung übt einen Zug auf den Upstream des Fluids aus und drückt es an den Seiten zurück in die Ecken.



# Instabilitäten - Taylor-Problem

- Viskoelastische Ströme führen zu neuen Instabilitätsmechanismen.
- Taylor-Problem: Strom zwischen konzentrischen Zylindern bei denen innere Zylinder rotiert oder auch beide.
- Bei geringen Rotationsraten fließt Strom entlang der konzentrischen Kreise.
- Bei hohen Rotationsraten entsteht durch die Zentrifugalkraft eine Instabilität die zu Taylorzellen führt.  
→ Analoge Muster bei viskoelastischen Strömen.
- Diese werden durch Normalspannungen verursacht nicht durch Zentrifugalkräfte.



Taylorzellen

Abb.: Mathematical Analysis of Viscoelastic Flows, Michael Renardy, S.8

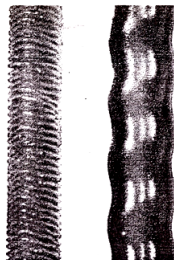
## Weitere Gründe für Instabilitäten

- Normalspannungsunterschiede zwischen zwei Flächen können bei zweilagigen Scherströmen zu Instabilitäten an den Grenzflächen führen.
- Verdrängung von Polymerschmelze von einer Öffnung führt oft zu Instabilitäten.
- Dies geschieht, wenn eine kritische Stromrate überschritten wird.
- Vermeidung der Instabilitäten ist von großer kommerzieller Wichtigkeit.
- Instabilität kann in der Herstellung zu inakzeptablen Produkten führen.
  - feine Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche: Haihaut
  - schwerwiegende Deformationen: Schmelzbrüche
- Beginn der Instabilität i.A. koinzident mit plötzlichem Anstieg der Stromrate.

# Schmelzbruch

Schmelzbruch wird seit 40 Jahren untersucht, trotzdem wurde noch keine vollständige theoretische Erklärung gefunden

- Weit verbreitet Hypothese: Phänomen könnte im Zusammenhang zum Abgleiten von Wänden steht.
- Genau Gesetze dazu und die Verbindung zwischen Abgleiten und Instabilitäten sind immer noch sehr spekulativ.
- Andere Hypothese: grundlegende Instabilität.
- Dabei steht ein Maximum in der Scherspannung einer Scherkurve gegenüber.
- Das Material erfährt einen plötzlichen Anstieg der Stromrate, wenn das Maximum erreicht wird.



Links:  
Haihaut  
Rechts:  
Schmelz-  
bruch

## Schlussbemerkung

- Es gibt noch viele weitere Phänomene bei polymeren Fluiden.
- Nicht jedes Phänomen ist bei jedem Polymer gleichstark ausgeprägt.
- Es gibt auch Phänomene, die nur bei einigen Polymeren auftreten.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

# Filmquellen

## Weissenberg-Effekt

- [www.youtube.com/watch?v=npZzlgKjs0I](http://www.youtube.com/watch?v=npZzlgKjs0I)

## Barus-Effekt

- [www.youtube.com/watch?v=KcNWLlpv8gc](http://www.youtube.com/watch?v=KcNWLlpv8gc)

## Siphon-Effekt

- [www.youtube.com/watch?v=t3neqUhoDRA](http://www.youtube.com/watch?v=t3neqUhoDRA)

## Paint on Speakers

- [www.youtube.com/watch?v=vGA4VzdvetQ](http://www.youtube.com/watch?v=vGA4VzdvetQ)

## Water on Speakers

- [www.youtube.com/watch?v=dhW6aFSKGqE](http://www.youtube.com/watch?v=dhW6aFSKGqE)

## Kontraktionsströme

- [www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/dynamics-of-high-deborah-number-entry-flows-a-numerical-study/4DCBB9D0FD4B928B39B06ACBBF702344#fndtn-supplementary-materials](http://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/dynamics-of-high-deborah-number-entry-flows-a-numerical-study/4DCBB9D0FD4B928B39B06ACBBF702344#fndtn-supplementary-materials)

## Taylor-Problem

- [www.youtube.com/watch?v=6IRPv0YRf18](http://www.youtube.com/watch?v=6IRPv0YRf18)