



## Versuchsanleitung

# Viskosität

Nummer: 05  
Kompiliert am: 29. März 2023  
Letzte Änderung: 29.03.2023  
Beschreibung: Bestimmung der Viskosität verschiedener Flüssigkeiten & der Temperaturabhängigkeit durch unterschiedliche Versuchsanordnungen.  
Webseite: <https://www.uni-ulm.de/nawi/institut-fuer-quantenoptik/ag-prof-jelezko/lehre/grundpraktikum-physik-physwiphys-la-phys/>

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>2</b>
<b>2 Stichpunkte zur Versuchsvorbereitung</b>	<b>2</b>
2.1 Theorie . . . . .	2
2.2 Beispiele aus Natur und Alltag . . . . .	2
<b>3 Versuchsdurchführung</b>	<b>3</b>
3.1 Kugelfall-Viskosimeter - Methode nach Stokes . . . . .	3
3.2 Ubbelohde-Viskosimeter . . . . .	3
3.3 Rotationsviskosimeter . . . . .	4
3.4 Häufige Fehler . . . . .	4
<b>4 Versuchszubehör</b>	<b>4</b>
<b>5 Hinweise zur Ausarbeitung</b>	<b>4</b>
5.1 Versuchsspezifisch . . . . .	4
5.2 Allgemein . . . . .	5
<b>Literatur</b>	<b>6</b>

# 1 Einführung

In diesem Versuch soll eine der charakteristischen Eigenschaften von Flüssigkeiten untersucht werden: die Viskosität. Diese phänomenologische Größe resultiert aus der Wechselwirkung der Flüssigkeitsmoleküle untereinander. Die Viskosität, früher auch als Zähflüssigkeit bezeichnet, beschreibt die innere Reibung einer bewegten Flüssigkeit mit einem räumlichen Geschwindigkeitsprofil. Definiert wird sie über das Newtonsche Reibungsgesetz. Messtechnisch kann sie über sehr verschiedene Wege erfasst werden. Im folgenden Versuch soll die Viskosität von Newtonschen Flüssigkeiten durch das Kugelfall-Viskosimeter und das Ubbelohde-Viskosimeter bestimmt werden. Außerdem soll die Temperaturabhängigkeit der Viskosität und die Viskosität von Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten durch ein Rotations-Viskosimeter untersucht werden.

## 2 Stichpunkte zur Versuchsvorbereitung

### 2.1 Theorie

Zur Versuchsdurchführung sollten folgende Punkte vorbereitet werden:

- Strömungen in Flüssigkeiten (Arten und Unterschiede) [Dem15, FK16]
- Viskosität [BS08, Dem15, FK16]
  - Definition (dynamische Viskosität  $\eta$  und kinematische Viskosität  $\nu$ )
  - Temperaturabhängigkeit
- Laminare und turbulente Strömungen mit Reynoldszahl [BS08, Dem15]
- Stokes'sche Reibung
  - Schweredruck, Auftrieb
  - Kugelfallviskosimeter (Ladenburg-Korrektur [Lad07])
- Gesetz von Hagen-Poiseuille [BS08, Dem15]
  - Herleitung ( $v(r) = \dots$  und  $\dot{V} = \dots$ )
  - Gültigkeitsgrenzen
- Herleitung zur Kontinuitätsgleichung [Dem15]
- Navier-Stokes-Gleichung [BS08]
  - Einzelne Terme erläutern
- Newtonsche und nicht-Newtonsche Flüssigkeiten mit Beispielen und Diagrammen [FK16]
- Arrhenius-Gleichung [FK16]
- Kapillarviskosimeter

### 2.2 Beispiele aus Natur und Alltag

- Rheologie (fast überall z.B. Lebensmittelindustrie, Schmiermittel)

- Pechtropfenexperiment
- Maisstärke und Wasser → nicht-newtonsche Flüssigkeit

### 3 Versuchsdurchführung

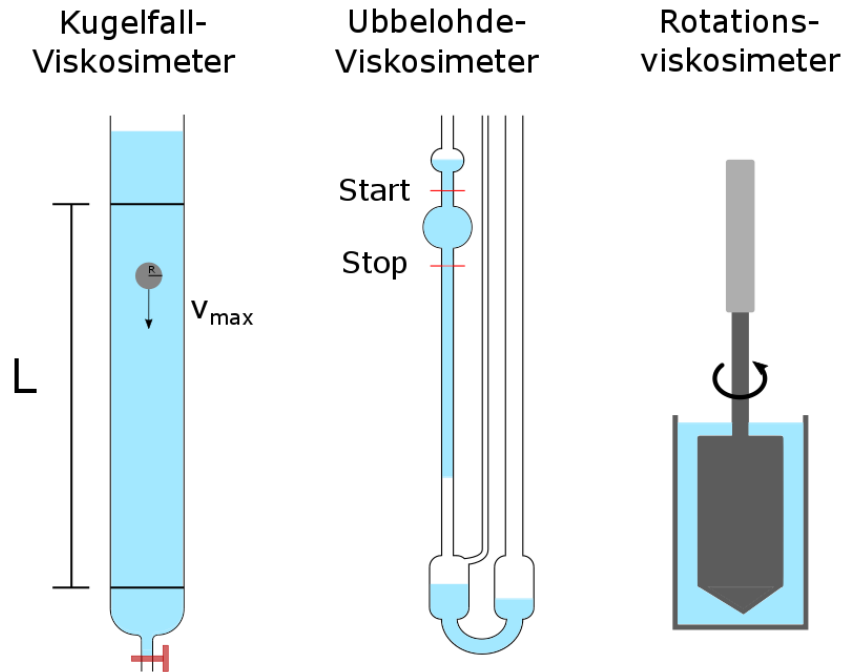


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des Kugelfall-Viskosimeters, des Ubbelohde-Viskosimeters und des Rotationsviskosimeters.

#### 3.1 Kugelfall-Viskosimeter - Methode nach Stokes

Es soll die Viskosität einer in einem hohen Plexiglaszylinder befindlichen Flüssigkeit bestimmt werden (Getriebeöl OKS 3740 [OKS]). Dazu sollen Kugeln von unterschiedlichen Radien in den Zylinder geworfen und die Durchlaufzeit gemessen werden, welche benötigt wird um die vorgegebener Höhendifferenz  $l$  zurückzulegen (4 verschiedene Kugeln und jeweils mindestens 4 Wiederholungen). Unter Zuhilfenahme des Stokes'schen Gesetzes kann die Ermittlung der Viskosität mittels linearer Regression geschehen. Die Messwerte und die korrigierten Messwerte (Ladenburg-Korrektur [Lad07], Zylinderdurchmesser messen!) sollen mit dem Literaturwert verglichen und diskutiert werden.

#### 3.2 Ubbelohde-Viskosimeter

Es soll der Glyceringehalt von zwei verschiedenen Wasser-Glycerin-Gemischen ermittelt werden. Dazu werden in je drei Messungen die Durchlaufzeiten der Gemische im Viskosimeter und daraus die Viskositäten bestimmt. Die Viskosimeter werden dabei in ein auf einer Temperatur von  $30^\circ\text{C}$  gehaltenes Wasserbad getaucht. Die Bestimmung der Zusammensetzung

der Gemische erfolgt anhand des Hagen-Poiseuille-Gesetzes und geeigneter Tabellenwerke ([dL67],[SO51],[Rei06] oder Online-Recherche z.B. mit den Stichpunkten "glycerol water viscosity"). Die benötigten Viskosimeter-Konstanten befinden sich bei den Viskosimetern.

### 3.3 Rotationsviskosimeter

- i. Zuerst soll Ketchup in das Viskosimeter eingebracht werden. Ketchup ist eine nicht-newtonsche Flüssigkeit. Das Fließverhalten von Ketchup soll untersucht und diskutiert werden. Dazu sollen die Job-Befehle „**Yield Point (CR)**“ und „**Thixotropy Loop**“ verwendet werden.
- ii. Weiter soll die Viskosität von Rapsöl bei verschiedenen Temperaturen bestimmt werden. Dazu wird das Viskosimeter durch einen Thermostat in 5°C-Schritten im Bereich von 25°C bis 55°C erwärmt. Bei jedem Temperaturschritt wird die Viskosität notiert. Mittels der Messwerte soll die Arrhenius-Gleichung überprüft werden. Zur Auswertung soll ein geeignetes graphisches Verfahren gewählt werden. Insbesondere soll die Aktivierungsenergie bestimmt werden.

### 3.4 Häufige Fehler

- Vorsicht beim Umfüllen von Ketchup: Diaphragma bei handelsüblichen Ketchup-Druckflaschen zerstört die Struktur  $\Rightarrow$  besser: vorsichtig Umfüllen mithilfe eines Löffels und kurz ruhen lassen

## 4 Versuchszubehör

- Glasröhre mit Stahlkugeln verschiedener Durchmesser zur Messung der Viskosität nach Stokes
- Stoppuhr
- Wasserbad mit Einhängethermostat und Kontrollthermometer
- Peleusball
- Zwei Ubbelohde Viskosimeter mit unterschiedlichen Gemischen aus destilliertem Wasser und Glycerin
- Rotationsviskosimeter mit Umwälzthermostat und Rotationszylinder

## 5 Hinweise zur Ausarbeitung

### 5.1 Versuchsspezifisch

- Herleitung der Geradengleichung zur Auswertung von Stokes und Rotationsviskosimeter

## 5.2 Allgemein

- Kopie des Laborbuchs anhängen
- Fehlerbalken in den Schaubildern
- Fehler des Mittelwerts richtig berechnen und Ergebnisse richtig runden (siehe Anleitung Limmer und/oder Folien zu unserem Statistik-Workshop)
- Gute Skizzen und Abbildungen verwendet (z.B. deutsche Beschriftung, Skizzen entsprechen den Erläuterungen, ...); Skizzen dürfen gerne selbst angefertigt werden
- Vergleich mit Literaturwerten
- Diskussion und/oder Wertung der Ergebnisse

## Literatur

- [BS08] BERGMANN, Ludwig ; SCHAEFER, Clemens: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 1: *Mechanik - Akustik - Wärme*. 12. Auflage. Berlin, New York : Walter de Gruyter Verlag, 2008
- [Dem15] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2015
- [dL67] D'ANS, Jean ; LAX, Ellen: *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*. Bd. 1. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1967
- [FK16] FROMMEYER, Bernd ; KOSŁOWSKI, Berndt: *Ergänzung zum Versuch Viskosität: Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten*. Ulm : Universität Ulm, 2016
- [Lad07] LADENBURG, R.: Über den Einfluß von Wänden auf die Bewegung einer Kugel in reibenden Flüssigkeiten. In: *Annalen der Physik* 23 (1907), S. 447
- [OKS] OKS SPEZIALSCHMIERSTOFFE: *Produktinformation Getriebeöl OKS 3740*. <https://shop.oks-germany.com/produkte/oele/getriebeoele/105/oks-3740>. – Zugriff: 22.06.2018
- [Rei06] REINEKER, Peter: *Theoretische Physik I: Mechanik*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2006
- [SO51] SEGUR, J. B. ; OBERSTAR, Helen E.: Viscosity of Glycerol and Its Aqueous Solutions. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 43 (1951), Nr. 9, S. 2117–2120. <http://dx.doi.org/10.1021/ie50501a040>. – DOI 10.1021/ie50501a040



# **Grundpraktikum Physik**

---

## **Ergänzung zum Versuch Viskosität: Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten**

---

Erstellt im Sommersemester 2016

von

**Bernd Frommeyer & Berndt Koslowski**

# Inhalt

1 Einleitung.....	3
2 Theoretische Grundlagen der Rheologie.....	3
2.1 Definition der Begriffe Rheologie und Viskosität .....	3
2.1.1 Herleitung der Viskosität.....	4
2.2 Verschiedene Arten fließender Substanzen und Arten des Fließes .....	5
2.2.1 Festkörper .....	6
2.2.2 Fluide und Gase.....	6
2.2.3 Verschiedene Arten von Fließvorgängen .....	7
2.3 Nicht-Newton'sche Fluide .....	8
2.3.1 Strukturviskose Flüssigkeiten .....	8
2.3.2 Dilatante Flüssigkeiten .....	9
2.3.3 Plastische Fluide .....	10
2.4 Thixotrope Fluide .....	11
2.4.1 Beschaffenheit der Substanz $S$ .....	11
2.5 Rheopexe Flüssigkeiten .....	13
2.6 Weitere Einflüsse auf die Viskosität.....	14
2.6.1 Der Druck $p$ .....	14
2.6.2 Die Temperatur $T$ .....	14
2.6.3 Das elektrische Feld $E$ .....	15
2.6.4 Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ .....	15
2.6.5 Die Zeit $t$ .....	15
3 Verschiedene Arten von Rheometern.....	16
3.1 Koaxiale Zylinder-Messeinrichtung .....	17
3.2 Kegel/Platte-Messeinrichtung.....	17
3.3 Platte/Platte-Messeinrichtung .....	18
4 Versuchsablauf .....	18
Versuchsdurchführung.....	18
Fragen zum Versuch .....	19
Literatur .....	19



# 1 Einleitung

Ursprünglich wurden im Praktikumsversuch ‚Viskosität‘ nur Newton’scher Fluide mit sehr einfachen Mitteln wie zum Beispiel dem ‚Kugelfall‘ untersucht. Dies ist didaktisch sicherlich sehr wertvoll, aber das Gebiet der Viskosität das sich aus ihr ergebende Gebiet der Rheologie ist sehr viel weiter. So sollte der Blickwinkel von der sehr eng gefassten Betrachtung Newton’scher Fluide vergrößert werden, indem komplexere rheologische Eigenschaften mit einem professionellen Gerät untersucht werden. Die vorliegende Zusammenfassung entstand aus einem Portfolio, das Bernd Frommeyer im Rahmen des Anfängerpraktikums erstellte. Es sollte im Versuch auch auf nicht-Newton’sche Fluide - insbesondere auf die Thixotropie - eingegangen werden und diese auf eine Weise untersucht werden, wie man es auch in der Industrie mit einem kommerziellen Gerät tun würde. Die einzelnen erweiterten Versuche werden allesamt in einer Serie mit Ketchup durchgeführt. Dies ist darin begründet, dass Ketchup zum einen ein strukturviskoser und thixotroper Stoff ist, andererseits ist aber auch die Anschaffung, der Umgang und die Entsorgung unkompliziert. Ein weiterer netter Nebeneffekt ist, dass den Studierenden die Relevanz der Rheologie am Beispiel eines ihnen bestens bekannten Stoffes näher gebracht wird.

Im Kapitel 2 werden die wichtigsten Grundlagen zum Verständnis dieses Praktikumsversuches gelegt. Die verwendeten Inhalte stammen, wenn keine anderen Quellen angegeben werden, aus den Referenzen [1] und [2]. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Ergänzung bzw. Zusammenfassung nicht als ausschließliche Quelle für die Vorbereitung des Versuches geeignet ist.

## 2 Theoretische Grundlagen der Rheologie

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Rheologie, die für diesen Versuch wichtig sind. Zuerst werden in Kapitel 2.1 die wichtigsten Begriffe der Rheologie erläutert. Anschließend werden in Kapitel 2.2 die verschiedenen Arten des Fließens rheologischer Substanzen betrachtet. In Kapitel 2.3 wird genauer auf nicht-Newton’sche Fluide eingegangen. Abschließend werden in Kapitel 2.4 die sogenannten thixotropen Flüssigkeiten genauer betrachtet und in Kapitel 2.5 die sogenannten rheopenen Flüssigkeiten kurz angesprochen.

### *2.1 Definition der Begriffe Rheologie und Viskosität*

Dieses Kapitel hat zum Ziel, dass ein Verständnis für den Begriff der Rheologie und der Viskosität gelegt wird. Dabei wird in Kapitel 2.1.1 die Herleitung der Viskosität gegeben. Anschließend werden noch andere Größen, wie zum Beispiel die Schubspannung, eingeführt. Diese sind elementar für das Verständnis des folgenden Kapitels.

Nach [3] stammt der Begriff Rheologie aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „Lehre des Fließens“. Er ist also der Teil der Wissenschaft, der sich mit dem Verformungs- und Fließverhalten von Materie beschäftigt. Die Teilgebiete der Rheologie beschäftigen sich mit der Elastizitätstheorie, der Plastizitätstheorie und der Strömungslehre. Dabei werden die Gesetzmäßigkeiten hierfür hergeleitet, wie zum Beispiel das Newton’sche Gesetz. Diese wichtigen Zusammenhänge und Formeln werden im Folgenden auch kurz diskutiert.

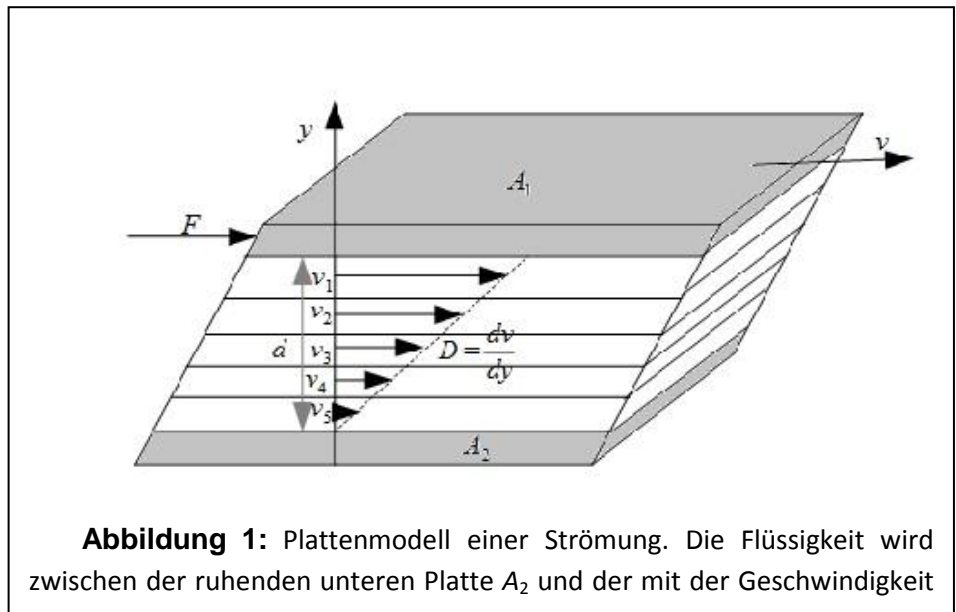
Zunächst wird der Begriff des Fließens näher beleuchtet. Dieser wird in [1] mit den Worten „Fließen ist eine leicht erreichbare Verformung eines Stoffes infolge einer Beanspruchung.“ beschrieben. Diese Definition weist darauf hin, dass in der Rheologie nur das Fließen von Fluiden betrachtet wird. Das plastische Verformen von Festkörpern ist hingegen nicht unbedingt ein rheologischer Vorgang. Die Grenzen

der Rheologie sind etwas ‚schwammig‘. Dennoch wird der Vorgang während des Theorieteils noch angesprochen. Die Größe, die die Verformung und die Beanspruchung verbindet, wird Viskosität genannt. Das Formelzeichen hierfür ist im Allgemeinen  $\eta$ .

### 2.1.1 Herleitung der Viskosität

Um sich ein genaueres Bild über die Viskosität zu machen, wird nun die Viskosität hergeleitet. Sie ist der Reibungskoeffizient, der die innere Reibung von Stoffen beschreibt. Die Reibung hängt von der Wechselwirkung der in der Flüssigkeit befindlichen Moleküle ab. Je fester die Moleküle durch die Wechselwirkungen aneinander haften, desto größer ist die Viskosität, desto zähflüssiger ist die Flüssigkeit und desto geringer ist die Fließgeschwindigkeit bei gleicher Beanspruchung. Auf diese Wechselwirkungen werden in Kapitel 2.4.1 noch genauer eingegangen. Nun wird das Plattenmodell einer Strömung betrachtet, welches in Abb. 1 zu sehen ist. Dort ist ein Fluid der Höhe  $d$ , welches in horizontale Schichten unterteilt ist, zu sehen. Es

wirkt eine Kraft  $F$  auf die obere Platte  $A_1$  in horizontaler Richtung. Aufgrund dieser Scherkraft bewegt sich die Platte mit der Geschwindigkeit  $v_0$ . Währenddessen bleibt die untere Platte  $A_2$  in Ruhe. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Schichten nehmen von oben  $v_0$  nach unten, wo sie schließlich ruht, ab.



**Abbildung 1:** Plattenmodell einer Strömung. Die Flüssigkeit wird zwischen der ruhenden unteren Platte  $A_2$  und der mit der Geschwindigkeit

#### Dynamische Viskosität

Sollen die Schichten sich schneller bewegen, so muss die Kraft  $F$  erhöht werden; also gilt:

$$F \propto v \quad (1)$$

Sollen die Platten ( $A_1$ ,  $A_2$ ) größer sein, so muss ebenfalls mehr Kraft aufgewendet werden um die Bewegung aufrecht zu erhalten. Es gilt somit auch:

$$F \propto A \quad (2)$$

Vermindert man den Abstand  $d$  zwischen den Platten  $A_1$  und  $A_2$ , so muss man ebenfalls eine größere Kraft aufwenden; also gilt zudem:

$$F \propto 1/d \quad (3)$$

Insgesamt ergibt sich die Proportionalität:

$$F \propto A \cdot v / d \quad (4)$$

Mit der Proportionalitätskonstanten  $\eta$ , fortan Viskosität genannt, ergibt sich:

$$F = \eta \cdot A \cdot v / d . \quad (5)$$

Allgemeiner schreibt man in differentieller Form

$$F_R = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dy} , \quad (6)$$

mit der Schergewwindigkeit  $dv/dy$ , die im Allgemeinen als  $\dot{\gamma}$  geschrieben wird. Sie hat die Einheit  $[\dot{\gamma}] = 1/s$ . Gleichung (6) wird also zu

$$F_R = \eta \cdot A \cdot \dot{\gamma} \quad (7)$$

bzw.

$$\eta = F_R / (A \cdot \dot{\gamma}) . \quad (8)$$

Die Einheit der Viskosität ist  $[\eta] = \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) = \text{Pa}\cdot\text{s}$ .

### Schubspannung

Eine weitere Größe, die sich aus der Reibungskraft  $F_R$  und der Fläche  $A$  ergibt, ist die sogenannte Schubspannung  $\tau$ . Diese ist als

$$\tau = F_R / A \quad (9)$$

definiert. Mit Hilfe der Schubspannung lässt sich die Viskosität aus Gleichung (8) auch als

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (10)$$

schreiben. Die physikalische Einheit der Schubspannung ist  $[\tau] = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2 = \text{Pa}$ . Diese Beziehung ist auch als Newton'sches Gesetz bekannt.

### Kinematische Viskosität

Die kinematische Viskosität  $\nu$  beschreibt das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität und der Dichte des Fluids  $\rho$ ; es gilt:

$$\nu = \eta / \rho . \quad (11)$$

Die resultierende physikalische Einheit der kinematischen Viskosität ist  $[\nu] = \text{m}^2/\text{s}$ .

## 2.2 Verschiedene Arten fließender Substanzen und Arten des Fließens

Das Fließen rheologischer Substanzen kann in zwei Kategorien aufgeteilt werden. Zum einen die der Festkörper und zum anderen die der Fluide. Der Begriff Fluid stammt vom lateinischen Wort „fluidus“, welches so viel wie „fließen“ bedeutet. Er fasst Flüssigkeiten und Gase zusammen. Diese verhalten sich bei vielen physikalischen Gesetzen gleichermaßen und können somit zusammengefasst werden. Die Fluide werden im Folgenden betrachtet, um ein Verständnis für typische Fließverhalten von Fluiden zu schaffen. Anschließend werden noch in Kapitel 2.2.2.1 die Newton'sche Fluide vorgestellt. Diese verhalten sich wie ideale Flüssigkeiten. Stoffe, die sich nicht entsprechend ideal verhalten, werden als nicht-Newton'sche Fluide bezeichnet und in Kapitel 2.2.2.2 behandelt. Die thixotropen Stoffe zählen zwar zu diesen nicht-

Newton'sche Fluiden, sie werden jedoch erst in Kapitel 2.4 behandelt, da auf sie etwas detailliert eingegangen werden soll.

### 2.2.1 Festkörper

Ideale Festkörper, auch Hook'sche Körper genannt, sind elastisch. Das heißt, dass die Energie, die den Körper verformt, beim Entlasten wieder zurückgewonnen werden kann. Dies bedeutet, dass sich der Körper nach dem Entlasten wieder zurück verformt. Außerdem ist die Spannung linear proportional zur Deformation. In der Natur gibt es jedoch keine idealen Festkörper. Denn reale Festkörper können unter Anwendung genügend großer Kräfte irreversibel verformt werden, sodass sie beginnen zu fließen. Dies gilt insbesondere für Gläser.

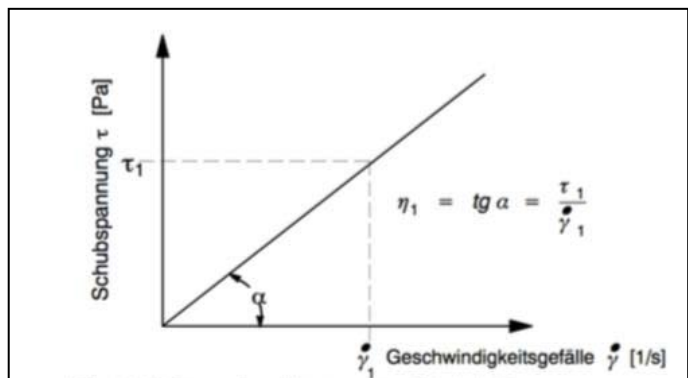
### 2.2.2 Fluide und Gase

Ideale Fluide und Gase werden unter Krafteinwirkung irreversibel verformt. Dies ist in Form des Fließens der Flüssigkeit oder des Gases zu beobachten. Die Energie, die zur Deformation aufgewendet werden muss, wird in Wärme umgewandelt und kann somit durch Entspannen des Fluids oder des Gases nicht mehr zurück gewonnen werden. In der Technik treten jedoch kaum Fluide und Gase auf, die sich als ideal bezeichnen lassen. Die meisten davon zeigen ein weiteres rheologisches Verhalten, welches als viskoelastisch bezeichnet wird. Auf diesen Begriff wird im Rahmen der nicht-Newton'schen Fluide eingegangen. Außerdem ist eine weitere Einteilung in Newton'sche Fluide und nicht-Newton'sche Fluide möglich. Diese werden nun vorgestellt.

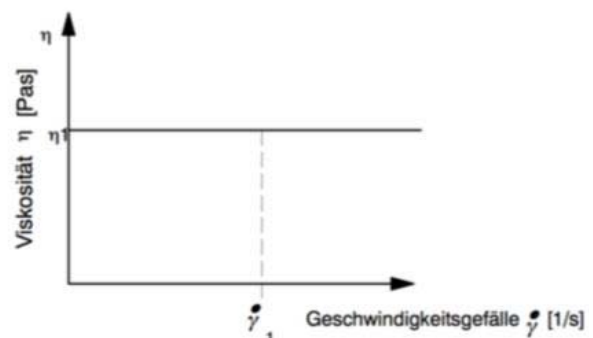
#### Newton'sche Fluide

Newton'sche Fluide haben ein lineares, viskoses Fließverhalten. Das bedeutet, dass die Scherspannung proportional zur Schergeschwindigkeit ist. Ein Beispiel hierfür ist Wasser. Ein Diagramm dazu ist in Abb. 2 zu sehen. Dabei wird die Schergeschwindigkeit als Geschwindigkeitsgefälle bezeichnet.

Es ist ein linearer Anstieg der Schubspannung mit der Schergeschwindigkeit zu sehen [2]. Es ist nun zu überlegen, welche Auswirkungen dies auf die Viskosität dieser Stoffe hat. Dazu betrachtet man die Gleichung (10) und beachtet, dass der Term  $\tau / \dot{\gamma}$  definitionsgemäß konstant ist. Alternativ geht dies auch aus Abb. 2 hervor. Das resultierende Diagramm ist in Abb. 3 zu sehen.



**Abbildung 2:** Fließkurve einer Newton'schen Flüssigkeit. Dabei ist die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gegen die Schubspannung  $\tau$  aufgetragen.



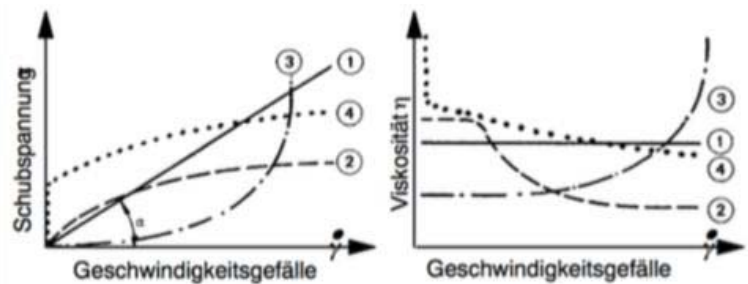
**Abbildung 3:** Viskositätskurve einer Newton'schen Flüssigkeit. Es ist die Viskosität  $\eta$  gegen die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen. Bei

## Nicht-Newton'sche Fluide

Als nicht-Newton'sche Fluide werden die bezeichnet, die nicht dem Newton'schen Gesetz  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$  gehorchen. Auf diese wird im Theorieteil noch genauer eingegangen. Einige Beispiele für nicht-Newton'sche Fluide sind Blut, Polymerschmelzen und Ketchup. Die Diagramme für die Fließkurve und Viskositätskurve in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit sind in Abb. 4 gegeben. Auf diese wird hier nicht genauer eingegangen, sondern auf Kapitel 2.3 verwiesen.

Die betrachteten Arten von nicht-Newton'schen Fluiden sind:

- 1 Newton'sche Flüssigkeiten,
- 2 strukturviskose Flüssigkeiten,
- 3 dilatante Flüssigkeiten und
- 4 plastische Flüssigkeiten (nach [2]).



**Abbildung 4:** Fließ- und Viskositätskurve von nicht-Newton'schen Flüssigkeiten. Linke Abbildung: hier ist die Schubspannung  $\tau$  gegen die Schergeschwindigkeit (hier Geschwindigkeitsgefälle)  $\dot{\gamma}$  aufgetragen. Rechte Abbildung: Hier ist die Viskosität  $\eta$  (hier Geschwindigkeitsgefälle)  $\dot{\gamma}$  gegen die Schergeschwindigkeit aufgetragen.

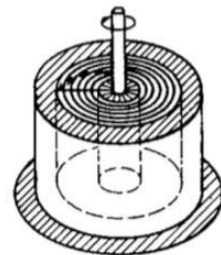
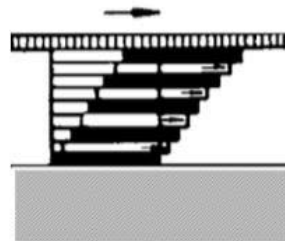
### 2.2.3 Verschiedene Arten von Fließvorgängen

Im Folgenden werden die typischsten Arten von Fließvorgängen diskutiert.

In Abbildung 5 bewegt sich eine Platte, währenddessen bleibt die andere in Ruhe. Welche Platte sich dabei bewegt, ist irrelevant. Der Raum zwischen den Platten kann in Schichten unterteilt werden, die sich gegeneinander verschieben lassen. Es ergibt sich eine laminare Schichtströmung in ebener Geometrie.

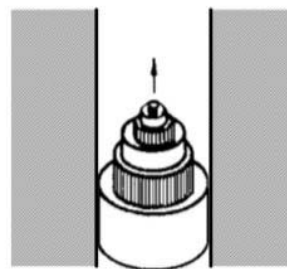
In Abbildung 6 rotiert der innere Zylinder, während der äußere in Ruhe bleibt. Dies ermöglicht wiederum eine laminare Strömung von zylinderförmigen Schichten. Dieses Fließen kann als ein vom Drehwinkel abhängiges Verschieben von ineinander liegend angeordneten, laminaren Schichten verstanden werden. Diese Art von Fließen wird von Rotations-Rheometern mit coaxialen Zylinder-Mess-einrichtungen zu Nutze gemacht.

In Abbildung 7 ist das Fließen eines Fluids entlang eines Rohres dargestellt. Es



**Abbildung 5 (links):** Ein Fluid zwischen zwei parallelen ebenen Platten wird durch horizontale Bewegung der oberen Platte zum Fließen gebracht. Vergleiche Plattenmodell (nach [2]).

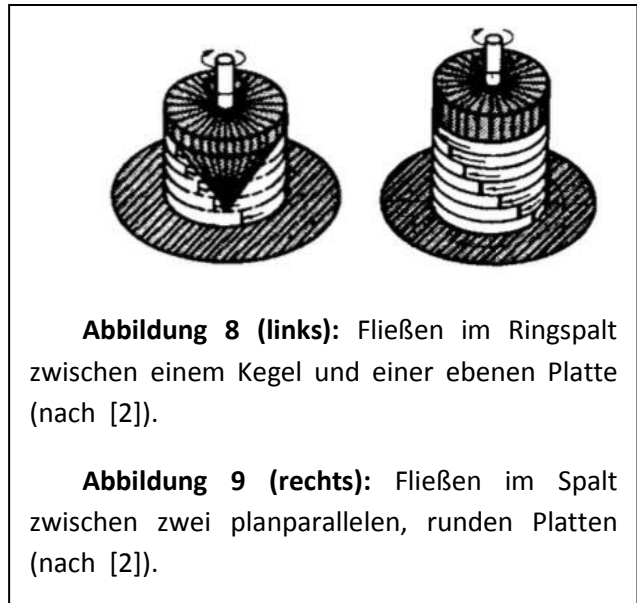
**Abbildung 6 (rechts):** Fließen im Ringspalt zwischen zwei coaxialen Zylindern. Der innere Zylinder rotiert, während der äußere in Ruhe bleibt (nach [2]).



**Abbildung 7:** Fließen durch Kapillaren, Breitschlitzdüsen, Schläuche oder Rohre. Das Fließen wird durch einen Druckunterschied hervorgerufen (nach [2]).

entsteht durch einen Druckunterschied entlang des Rohres. Eine ideale Flüssigkeit hat ein Strömungsprofil entsprechend eines Paraboloids, d.h. die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt des Rohres ist parabolische. Dabei ist die höchste Geschwindigkeit  $v_{max}$  in der Mitte des Rohres. Diese Geschwindigkeit nimmt nach außen hin ab bis sie am Rand zum Stehen kommt. Dieses Verhalten wird durch das Gesetz von Hagen-Poiseuille beschrieben.

Die Abbildungen 8 und 9 können zusammengefasst werden. Im Allgemeinen bleibt eine der beiden Begrenzungsflächen in Ruhe und die andere rotiert. Dabei werden die oberen oder unteren Schichten horizontal in Bewegung gebracht. Diese Bewegung pflanzt sich durch die tiefer oder höher liegenden Schichten fort.



**Abbildung 8 (links):** Fließen im Ringspalt zwischen einem Kegel und einer ebenen Platte (nach [2]).

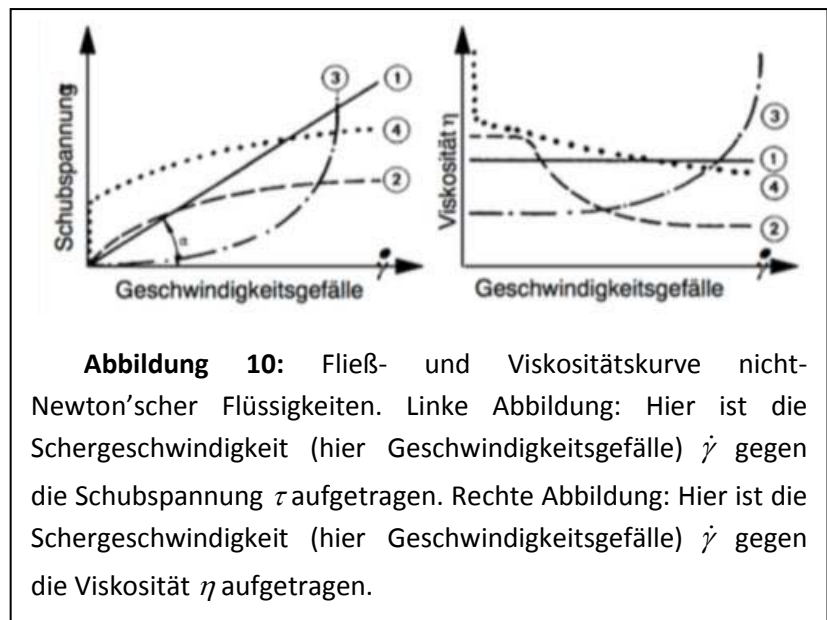
**Abbildung 9 (rechts):** Fließen im Spalt zwischen zwei planparallelen, runden Platten (nach [2]).

## 2.3 Nicht-Newton'sche Fluide

In diesem Kapitel wird genauer auf die nicht-Newton'schen Fluide, die schon in Kapitel 2.2.2.2 erwähnt wurden, eingegangen. Es werden die verschiedenen Arten von nicht-Newton'schen Fluiden diskutiert. Auf die letzte Art von nicht-Newton'schen Fluiden, den thixotropen Fluiden, wird jedoch erst in Kapitel 2.4 eingegangen, da diese hervorgehoben werden sollen.

Die betrachteten Arten von Fluiden sind (siehe Abb. 10): zum Vergleich 1 Newton'sche Flüssigkeiten und die nicht-Newton'schen Fluide  
 2 strukturviskose Flüssigkeiten,  
 3 dilatante Flüssigkeiten und  
 4 plastische Flüssigkeiten.

Zur besseren Übersicht sind die Kurven in Abb. 10 zusammen dargestellt. Es werden nun anhand der einzelnen Fließ- und Viskositätskurven die verschiedenen Arten von nicht-Newton'schen Fluiden eingeführt. Dabei wird in der nummerierten Reihenfolge von Abb. 10 vorgegangen. Graph 1 ist zum besseren Vergleich der Fall der bereits behandelten Newton'schen Flüssigkeit.

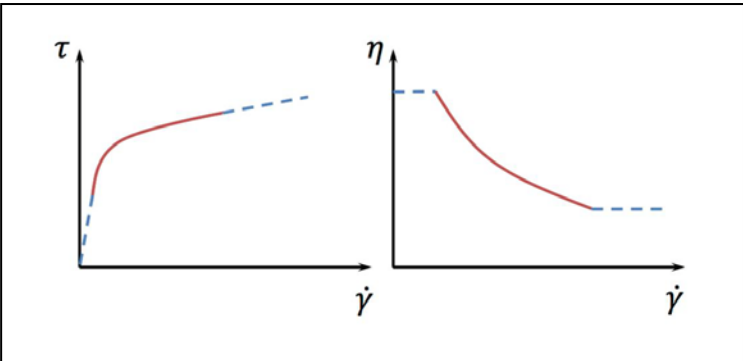


**Abbildung 10:** Fließ- und Viskositätskurve nicht-Newton'scher Flüssigkeiten. Linke Abbildung: Hier ist die Schergeschwindigkeit (hier Geschwindigkeitsgefälle)  $\dot{\gamma}$  gegen die Schubspannung  $\tau$  aufgetragen. Rechte Abbildung: Hier ist die Schergeschwindigkeit (hier Geschwindigkeitsgefälle)  $\dot{\gamma}$  gegen die Viskosität  $\eta$  aufgetragen.

### 2.3.1 Strukturviskose Flüssigkeiten

Die nächste Kurve 2 (siehe Abb. 10) ist die einer strukturviskosen Flüssigkeit, auch pseudoplastische Flüssigkeiten genannt. Strukturviskose Flüssigkeiten haben die Eigenschaft, dass eine starke Viskositätsabnahme auftritt, wenn die Schergeschwindigkeit erhöht wird. Diese Eigenschaft wird auch als

scherverdünnendes Fließverhalten bezeichnet. Die Abnahme der Viskosität kann dabei mehrere Dekaden betragen. Somit ist die Viskosität eine Funktion der Schergeschwindigkeit, also  $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ . Die Erklärung, warum dies so ist, wird in Kapitel 2.4 gegeben. In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass strukturviskose Flüssigkeiten bei sehr kleinen und sehr großen Schergeschwindigkeiten sich annähernd wie Newton'sche Fluide verhalten. Dies ist in Abb. 11 zu sehen. Dabei sind die gestrichelten Bereiche die, in der sich die Flüssigkeit annähernd wie eine Newton'sche Flüssigkeit verhält. Eine weitere Eigenschaft von diesen Flüssigkeiten ist, dass, wenn man aufhört die Flüssigkeit zu scheren, also  $\dot{\gamma} = 0$ , sich sofort die anfängliche Viskosität zurückbildet. Eine mathematische Beschreibung ist das Modell von Ostwald-de Waele. Dieses beschreibt die Viskosität folgendermaßen:



**Abbildung 11:** Fließ- und Viskositätskurve von strukturviskosen Flüssigkeiten. Links: Fließkurve (Schubspannung  $\tau$  gegen Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen) Rechts: Viskositätskurve (Viskosität  $\eta$  aufgetragen gegen die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$ ) (nach [1]).

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}. \tag{12}$$

Dabei ist  $K$  der Fließkoeffizient oder die *Konsistenz*,  $n$  ist eine von der Flüssigkeit abhängende Größe, die für strukturviskose Flüssigkeiten kleiner als 1 ist, also  $n < 1$ . Für die Schubspannung ergibt sich dann der Term

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n. \tag{13}$$

Die Problematik an diesem Modell ist, dass es für sehr kleine und sehr große Schergeschwindigkeiten unrealistische Werte liefert. Denn

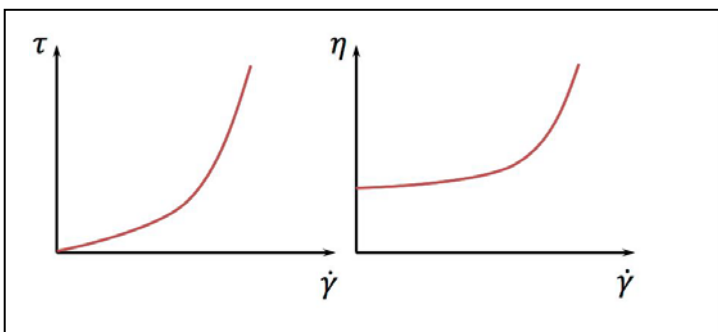
$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \eta = +\infty, \tag{14}$$

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \eta = 0. \tag{15}$$

Deshalb ist es üblich, die Schergeschwindigkeit auf einen Bereich von  $\dot{\gamma}_{\min} \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\max}$  einzugrenzen. Einige Beispiele für strukturviskose Flüssigkeiten sind Polymerschmelzen, Blut und Lacke.

### 2.3.2 Dilatante Flüssigkeiten

Dilatante Flüssigkeiten haben ein scherverdickendes Verhalten, ein Beispiel ist mit Graph 3 gegeben (siehe Abb. 10). Diese Flüssigkeiten verhalten sich konträr zu den strukturviskosen Flüssigkeiten, denn sie



**Abbildung 12:** Fließ- und Viskositätskurve von dilatanten Flüssigkeiten. Links: Fließkurve (Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gegen Schubspannung  $\tau$  aufgetragen) Rechts: Viskositätskurve (Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gegen Viskosität  $\eta$  aufgetragen) (nach [1]).

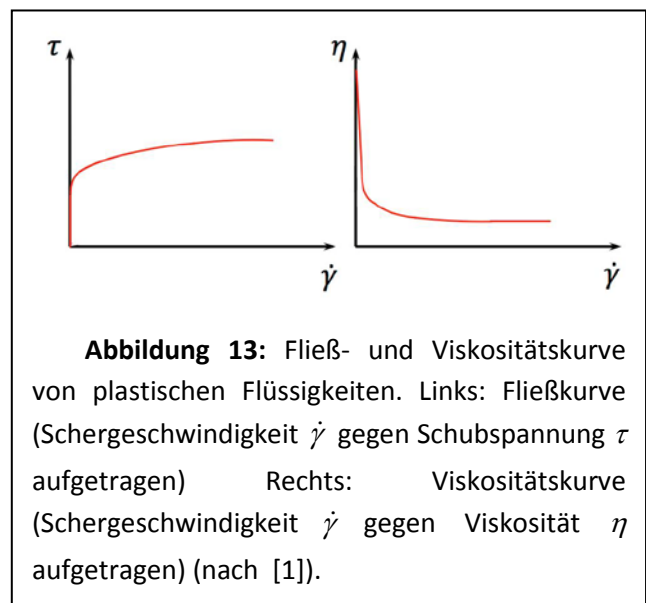
bilden eine höhere Viskosität aus, wenn die Schergeschwindigkeit erhöht wird. Der Graph für die Schubspannung und die Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit ist in Abb. 12 zu sehen. Erklären kann man sich dieses Verhalten durch eine hohe Anzahl von Festkörpern bzw. Partikeln in der Dispersion, wohingegen nur wenig Weichmacher enthalten ist. Dieser füllt die Hohlräume aus und gibt dem Stoff einen flüssigen Charakter. Bei kleinen Schergeschwindigkeiten lassen sich die Partikel leicht gegeneinander verschieben. Wird die Schergeschwindigkeiten jedoch höher, so drücken sich die Partikel gegenseitig auseinander und verursachen eine Volumenzunahme der Substanz. Nun hat der Weichmacher im Vergleich zum Gesamtvolumen einen noch geringeren Anteil und kann nicht mehr alle Lücken füllen. Deswegen können die einzelnen Partikel nur sehr schlecht aneinander vorbei gleiten, was zu einer Viskositätszunahme führt. Dieser Vorgang heißt Dilatanz und gibt dieser Art von Flüssigkeit ihren Namen. Beispiele für solche Flüssigkeiten sind Dispersionen wie Plastisolen.

Das dilatante Verhalten lässt sich auch mit dem Ostwald-de Waele-Modell beschreiben. In diesem Fall lautet es

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} + \eta_0 \text{ mit } n < 1. \quad (17)$$

### 2.3.3 Plastische Fluide

In Kurve 4 in Abb. 3, auch in Abb. 13 zu sehen, ist ein plastisches Fluid. Diese Art von Fluid hat eine sogenannte Fließgrenze  $\tau_0$ . Bis zu dieser liegt das Fluid als Feststoff vor und wird erst zum Fluid, wenn die Fließgrenze überschritten wird. Dabei brechen die Gerüststrukturen innerhalb des Sto zusammen und es beginnt zu fließen. Das Gerüst wird durch ein intermolekulares Netz von Bindungskräften, wie zum Beispiel polare Bindungen oder van-der-Waals-Kräfte, gebildet. Diese Bindungen verhindern den Ortswechsel der Volumenelemente, womit ein Feststoff bzw. ein Fluid mit unendlich hoher Viskosität vorliegt. Durch Eigenschaften von Festigkeit und Viskosität kann man solche Stoffe zu den Feststoffen wie auch zu den Fluiden zählen.



**Abbildung 13:** Fließ- und Viskositätskurve von plastischen Flüssigkeiten. Links: Fließkurve (Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gegen Schubspannung  $\tau$  aufgetragen) Rechts: Viskositätskurve (Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gegen Viskosität  $\eta$  aufgetragen) (nach [1]).

Eine mathematische Beschreibung liefert das Herschel-Bulkley-Modell. Es ist eine Erweiterung des Ostwald-de Waele Modell. Bei diesem wird ein konstanter Wert addiert. Dies führt dann zur Beziehung

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} + \eta_0 \text{ mit } n = 2. \quad (18)$$



Beispiele für solche Fluide sind Druckfarben, Cremes, Lippenstifte oder Zahnpasten.

Eine besondere Art dieser Fluide sind die sogenannten Bingham-Fluide. Deren Schubspannung und Viskosität in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit ist in Abb. 14 zu sehen. Die Bingham-Fluide lassen sich auch mit dem Herschel-Bulkley-Modell beschreiben.

## 2.4 Thixotrope Fluide

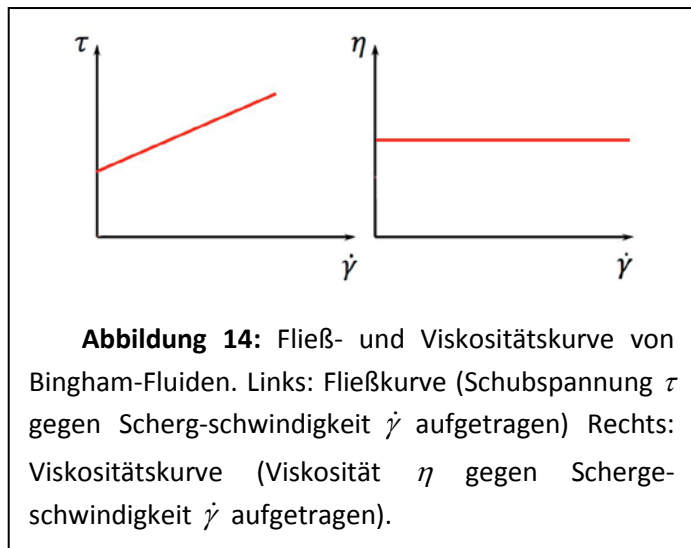
Eine Definition der Thixotropie wird in [1] gegeben. Diese lautet: „Thixotropes Verhalten bedeutet die Verringerung der Viskosität während einer Scherbelastungsphase und der vollständigen Wiederaufbau während der Ruhephase“. In diesem Kapitel wird nun genauer auf die Thixotropie eingegangen.

Bisher wurde die Viskosität entweder mit Hilfe des Newton'schen Gesetzes, oder mit dem Ostwald-de Waele'schen-Modells berechnet. In diesen Gleichungen gibt es jedoch nur wenige Parameter zur Berechnung der Viskosität. Dies spiegelt aber nicht die Realität wieder und gilt nur unter bestimmten Bedingungen. In diesem Kapitel werden nun die einzelnen Faktoren diskutiert, die einen Einfluss auf die Viskosität haben.

### 2.4.1 Beschaffenheit der Substanz S

Der Faktor Beschaffenheit  $S$  beschreibt die physikalisch-chemische Beschaffenheit der zu messenden Substanz. Dies zu kennen ist wichtig, da verschiedenartige Bindungen in Flüssigkeiten vorliegen können. Es ist beispielsweise offen sichtlich, dass Wasser eine andere Viskosität und Konsistenz hat als Honig oder Erdöl.

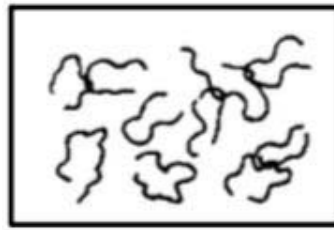
Die meisten Produkte, die im Alltag verwendet werden, sehen homogen aus. Jedoch bestehen diese meist aus mehreren verschiedenen zum Teil mikroskopischen Komponenten. Insbesondere ist dies auch so bei thixotropen und strukturviskosen Fluiden. Diese Komponenten können zum Beispiel verschiedenartige Füllstoffe sein, die sich in der Flüssigkeit befinden. Die Füllstoffe können als Partikel in Kugel- oder Stabform oder als Aggregate von Primärpartikeln mit unregelmäßiger Form und Oberflächenbeschaffenheit vorliegen. Weitere Möglichkeit sind eine tropfenförmige Flüssigkeit, die in einer anderen Flüssigkeit dispergiert ist, oder verzweigte beziehungsweise ineinander verschlungene, lange Molekülketten. Diese Art von Partikeln wird im Folgenden diskutiert. Anzumerken ist jedoch noch, dass in den Fluiden weitere Bindungen wie Wasserstoffbrücken, Dipolkräfte oder van-der-Waals Kräfte auftreten können, die hier nicht weiter beachtet werden.



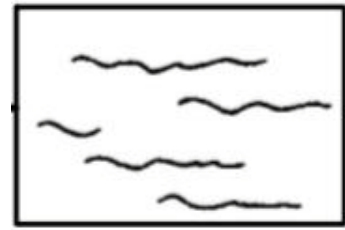
**Abbildung 14:** Fließ- und Viskositätskurve von Bingham-Fluiden. Links: Fließkurve (Schubspannung  $\tau$  gegen Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen) Rechts: Viskositätskurve (Viskosität  $\eta$  gegen Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen).

## Streckung

Die erste Art von Partikeln, die betrachtet wird, sind die verzweigten oder ineinander verschlungenen Molekülketten. Diese liegen im Ruhezustand wie in Abb. 15 vor. In diesem Zustand bilden die einzelnen Partikel einen großen inneren Widerstand, so dass das Fluid nicht so einfach ins Fließen geraten kann. Wird die Flüssigkeit jedoch geschert, so werden die verzweigten Molekül-



**Abbildung 15 (links):** Verzweigte oder ineinander verschlungene Molekülketten vor der Scherung (nach [2]).

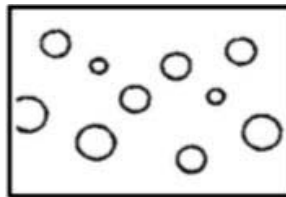


**Abbildung 16 (rechts):** Verzweigte oder ineinander verschlungene Molekülketten während der Scherung (nach [2]).

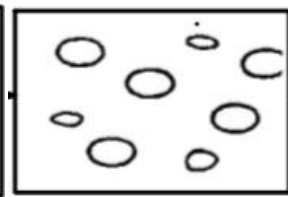
ketten in Fließrichtung ausgerichtet und die ineinander verschlungenen Molekülketten werden auseinandergezogen, so dass diese sich ebenfalls in Fließrichtung ausrichten können. Zu sehen sind diese beiden Vorgänge in Abb. 16. Diese Art von Partikeln kommt vor allem bei Polymerschmelzen und Lösungen vor.

## Kugelförmige Partikel

Als Zweites werden nun Flüssigkeiten, die in kugelförmigen Partikeln in einer Flüssigkeit vorliegen, betrachtet. Diese sind in Abb. 17 in einer stehenden Flüssigkeit zu sehen. Wird nun die Flüssigkeit zum Fließen gebracht, so deformieren die Kügelchen sich zu Ovoiden, wie sie in Abb. 18 zu sehen sind. Kommt die Flüssigkeit wieder zum Stehen, so verformen sich die Ovoiden elastisch zurück in die ehemaligen Kügelchen. Ein



**Abbildung 17 (links):** Kugelförmige Partikel vor der Scherung (nach [2]).

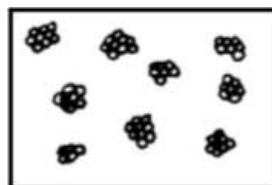


**Abbildung 18 (rechts):** Kugelförmige Partikel während der Scherung (nach [2]).

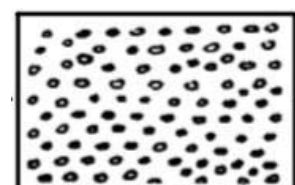
Beispiel hierfür sind die Erythrozyten (rote Blutkörperchen). Diese haben in ausreichend weiten Adern einen Durchmesser von etwa  $8\mu\text{m}$  und sind im Blutplasma dispergiert. Verengen sich nun die Adern und fließt das Blut schnell genug, wie dies zum Beispiel in Blutkapillaren der Fall ist, so können sich die Erythrozyten auf einen Durchmesser von unter  $3\mu\text{m}$  mit entsprechender Längenzunahme verengen.

## Disaggregation

Als nächstes werden Aggregate betrachtet. Diese bilden sich beispielsweise durch pulverförmige Füllstoffe oder Pigmente die sich zu Aggregaten zusammenfügen. Dies geschieht zum Beispiel in Streichfarben und ist in Abb. 19 zu sehen. In Abb. 20 ist nun diese Flüssigkeit während der



**Abbildung 19 (links):** Aggregate von Primärpartikeln vor der Scherung (nach [2]).

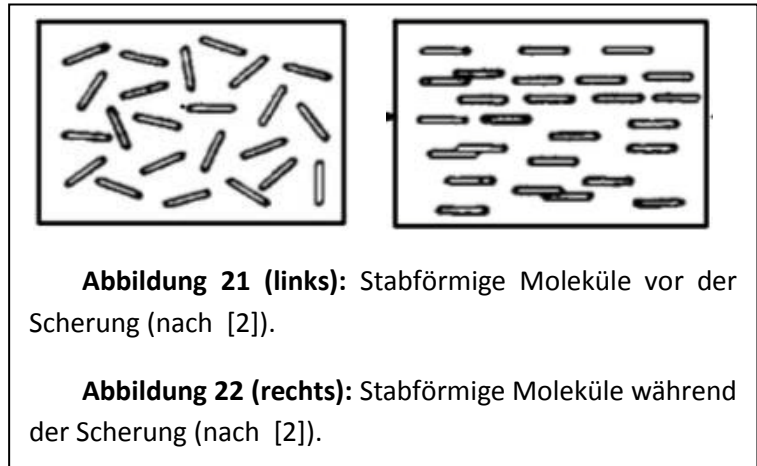


**Abbildung 20 (rechts):** Aggregate von Primärpartikeln nach der Scherung (nach [2]).

Scherung zu sehen. Dabei sind die Aggregate aufgebrochen worden, so dass der Innenwiderstand reduziert wird und sich die Viskosität erniedrigt. Wenn die Flüssigkeit wieder zum Stehen kommt, so kommt es bei manchen Arten von Aggregaten wieder zur Rückbildung von diesen, sodass die anfängliche Viskosität wieder hergestellt wird.

### Stabförmige Moleküle

Zuletzt werden noch stabförmige Partikel betrachtet. Wenn die Flüssigkeit, wie in Abb. 21, in Ruhe ist, können sich die einzelnen Stäbchen nur schlecht bewegen. Das liegt daran, dass sie schon bei kleinsten Bewegungen an andere Stäbchen stoßen und sich mit diesen verkanten. So kommt ein Fließen nur schwer zustande. Wird diese aber nun durch eine ausreichend hohe Scherspannung ins Fließen gebracht, so richten sich die einzelnen Stäbchen in Fließrichtung aus. Diese können zum Beispiel— Kunststoffmoleküle einer Schmelze oder Lösung sein.

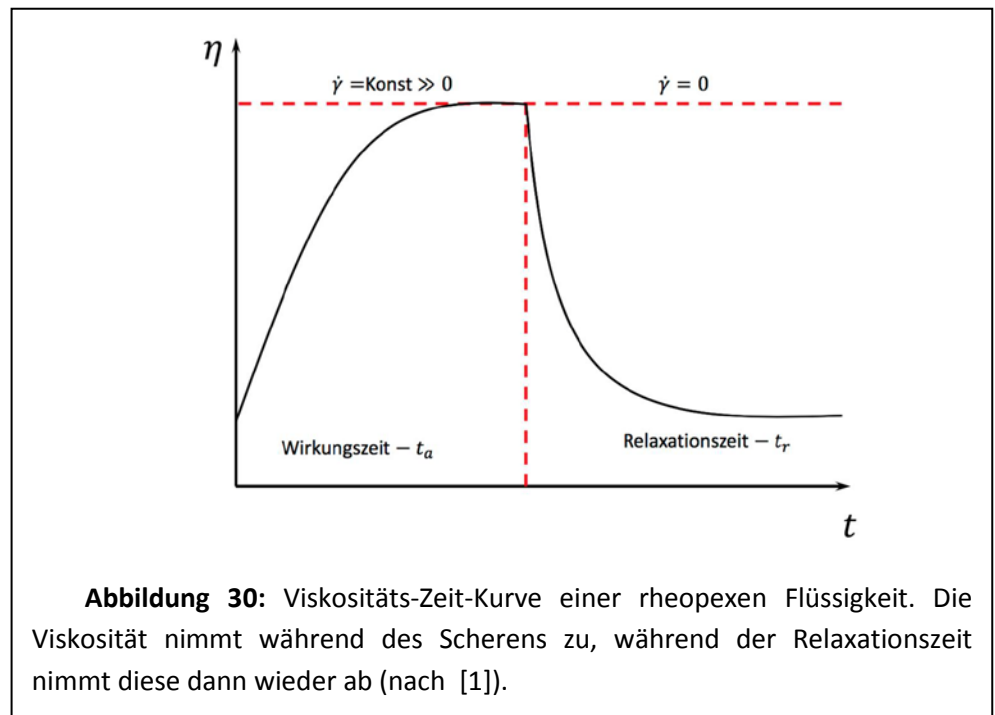


**Abbildung 21 (links):** Stabförmige Moleküle vor der Scherung (nach [2]).

**Abbildung 22 (rechts):** Stabförmige Moleküle während der Scherung (nach [2]).

## 2.5 Rheopexe Flüssigkeiten

Der Vollständigkeit halber sei zum Schluss dieses Theorieteils noch angemerkt, dass es Flüssigkeiten gibt, die sich entgegengesetzt zu den thixotropen Flüssigkeiten verhalten. Dies ist in Abb. 30 zu sehen. Sie erhöhen also die Viskosität im Laufe des Schervorgangs und erniedrigen sie wieder während der Relaxationszeit. Beispiele sind hier wieder in der Küche zu finden wie



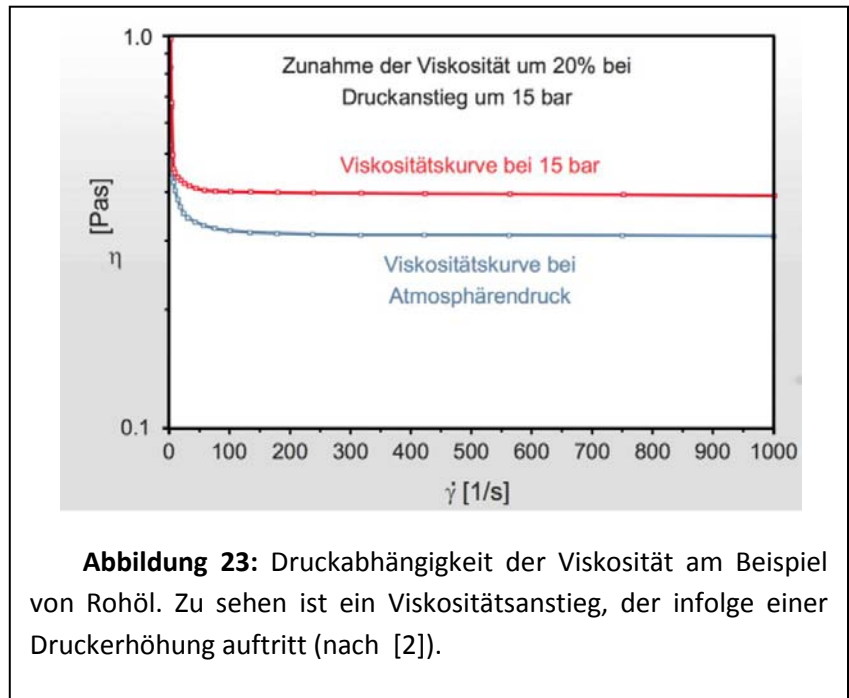
**Abbildung 30:** Viskositäts-Zeit-Kurve einer rheopexen Flüssigkeit. Die Viskosität nimmt während des Scherens zu, während der Relaxationszeit nimmt diese dann wieder ab (nach [1]).

z.B. Stärkemischungen oder auch Teig, Suspensionen und Solen.

## 2.6 Weitere Einflüsse auf die Viskosität

### 2.6.1 Der Druck $p$

Der Druck  $p$  hat lediglich bei hohen Drücken einen nennenswerten Einfluss auf die Viskosität. Dies ist in Abb. 23 zu erkennen. Es liegt daran, dass Flüssigkeiten im Allgemeinen nur eine geringe Kompressibilität haben. Wird die Flüssigkeit jedoch merklich komprimiert, so werden die einzelnen Moleküle innerhalb der Flüssigkeit enger aneinander gepresst, sodass sich die innere Reibung erhöht und somit auch die Viskosität. Zum Beispiel steigt die Viskosität von Bohrschlamm bei einer Druckerhöhung auf 1000 bar und ca. 30%.

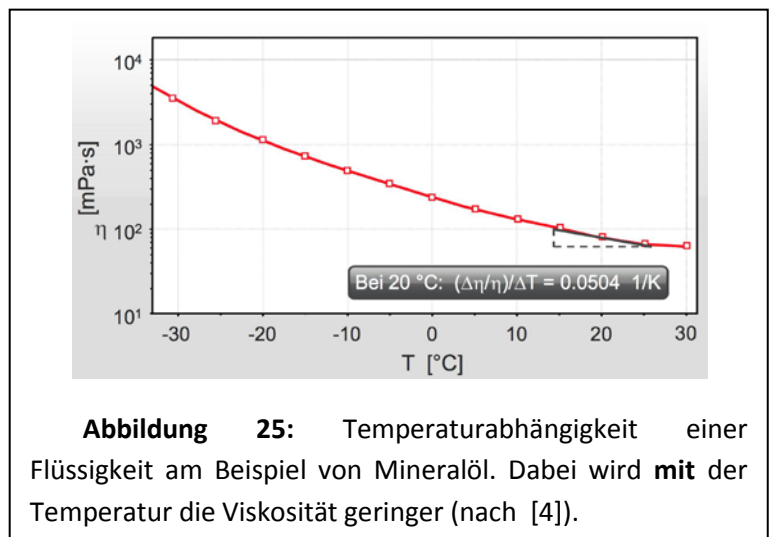
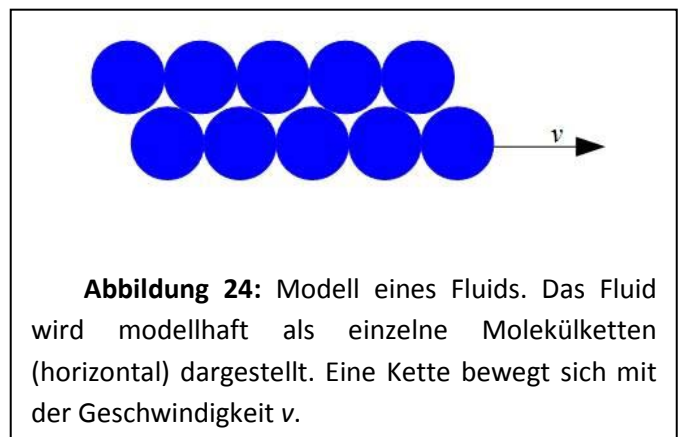


### 2.6.2 Die Temperatur $T$

Man stellt sich nun die Flüssigkeiten als Molekülketten vor, wie es in Abb. 24 dargestellt ist. Dabei ist die mittlere freie Weglänge in etwa die des mittleren Molekülabstands. Um einzelne Molekülketten zu verschieben, muss man eine Energie aufbringen, da die Molekülketten nicht einfach aneinander vorbei gleiten können, sondern miteinander verzahnt sind und somit aneinander reiben. Diese benötigte Energie nennt man Aktivierungsenergie  $E_a$ . Wird nun die Temperatur erhöht, so erhöht sich auch die mittlere freie Weglänge der Moleküle und die Aktivierungsenergie nimmt ab. Daraus motivierte der Schwede Arrhenius folgende Beziehung:

$$\eta = B \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (21)$$

Diese ist als Arrhenius-Beziehung bekannt. Dabei ist  $R$  die allgemeine Gaskonstante ( $R \cong 8.3145 \text{ J/mol}$ ) und  $B$  eine Materialkonstante. Daraus lässt sich ablesen, dass die Viskosität bei Flüssigkeiten bei zunehmender Temperatur abnimmt. Im Modell (Abb. 24)



kann man sich das so vorstellen, dass die Moleküle mehr Energie haben und somit leichter über die anderen Molekülketten gleiten können. Bei Gasen ist jedoch das Gegenteil der Fall, eine Erklärung hierfür ist die bei höherer Temperatur ansteigende Stoßrate zwischen den Molekülen. Der Einfluss der Temperatur ist auch in Abb. 25 zu sehen. Dabei kann eine Temperaturänderung von nur 1 K eine Viskositätserniedrigung von bis zu 10 % führen.

### 2.6.3 Das elektrische Feld E

Ein weiterer Faktor ist das elektrische Feld. Dieses ist aber nur für spezielle Suspensionen wichtig. Diese werden „elektroviskose Fluide“ (EVF) oder „elektrorheologische Fluide“ (ERF) genannt. Sie enthalten dielektrische Partikel wie Aluminiumsilikate, die in einem elektrischen Feld polarisiert werden.

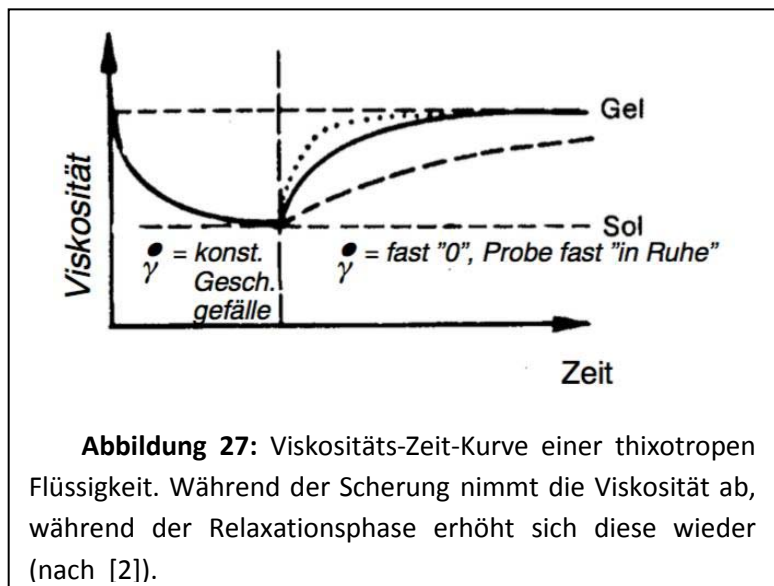
### 2.6.4 Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$

Die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  hat wie bereits beschrieben einen großen Einfluss auf die Viskosität. Welchen Einfluss, ob Viskositätserhöhung oder –erniedrigung, ist dabei vom jeweils zu untersuchenden Stoff abhängig (siehe [4]).

### 2.6.5 Die Zeit t

Der letzte hier zu erwähnende Faktor ist die Zeit t. Denn es ist wichtig zu wissen, was mit der Flüssigkeit vor dem Scherversuch geschehen war (siehe auch oben). Wenn eine Flüssigkeit bereits geschert worden war, ist unter Umständen die Viskosität geringer als vor der ersten Scherung.

Was thixotrope Flüssigkeiten von anderen unterscheidet ist, dass sich die Verbindungen der Moleküle, die in Kapitel 2.4.1 beschrieben sind, sich erst mit der Zeit zurück, Also nicht instantan wie bei strukturviskosen Flüssigkeiten. Thixotrope Flüssigkeiten kann man als strukturviskose Flüssigkeiten mit einer weiteren Variablen, der Zeit t ansehen. Diese gegen die Viskosität abgetragen ist in Abb. 27 zu sehen.



Die angegebene Kurve erhält man, wenn man die thixotrope Flüssigkeit, hier Gel genannt, schert. Dieser Vorgang ist bereits bekannt. Die Viskosität wird durch die Schergeschwindigkeit auf ihren niedrigst möglichen Wert erniedrigt. Dieser ist der sogenannte Solzustand und kann binnen weniger Sekunden oder Minuten erreicht werden. Man müsste nicht bis zu diesem Wert scheren, um das Phänomen zu beobachten. Man fährt nun die Schergeschwindigkeit so weit nach unten, bis man die Viskosität gerade noch messen kann. Durch das Ruhen der Flüssigkeit in der Relaxationszeit bilden sich die aufgebrochenen Strukturen zurück. Wie lange es dauert, bis die vorherige Struktur mit der hohen Viskosität erreicht wird, ist jedoch von der jeweiligen Substanz abhängig. Der Vorgang kann zwischen einigen Sekunden oder Monaten in Anspruch nehmen. Jedoch ist die Regeneration bei einzelnen Stoffen schon nach einigen Sekunden oder Minuten bei 30 bis 50 % der ursprünglichen Viskosität.

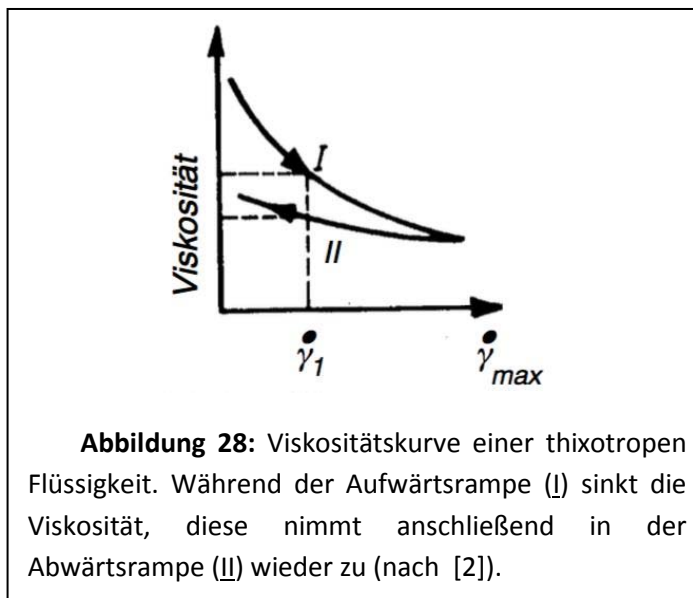
Die Besonderheit, dass sich die Struktur des Stoffes erst mit der Zeit zurück bildet, kann auch in der Viskositätskurve gesehen werden. Dies ist in Abb. 28 zu sehen.

Dabei ist I die sogenannte Aufwärtsrampe. Dies bedeutet, dass die Flüssigkeit von einer Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_0 = 0$  bis zu einer Schergeschwindigkeit von  $\dot{\gamma}_{max}$  erhöht wird. Die Abwärtsrampe ist die Gegenrichtung, also die Schergeschwindigkeit wird heruntergefahren. Das Resultat sind zwei Kurven, die obere Aufwärtsrampe und die untere Abwärtsrampe. Dies bedeutet, dass es zu einer Schergeschwindigkeit zwei verschiedene Viskositätswerte gibt. Dies ist jedoch nur bei thixotropen (und rheopexen) Flüssigkeiten der Fall. Bei einfachen strukturviskosen oder dilatanten Fluiden verlaufen die Aufwärtsrampe und die Abwärtsrampe auf derselben Kurve.

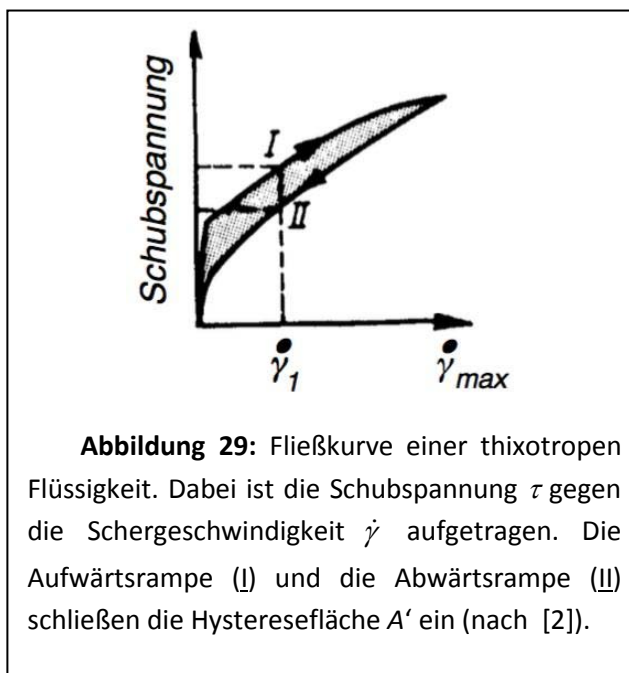
In Abb. 29 ist statt der Viskosität die Schubspannung  $\tau$  gegen die Schergeschwindigkeit aufgetragen. Auch hier sind wieder die Aufwärtsrampe und die Abwärtsrampe zu sehen. Diese schließen nun aber eine Fläche ein, die in der Abbildung grau gekennzeichnet ist. Diese Fläche  $A'$  ist die sogenannte Hystereseffläche, die quantitativ die scherzeitabhängige Thixotropie anzeigt. Diese wird mit der Formel

$$\Delta A' = \Delta \tau \cdot \Delta \dot{\gamma} \quad (22)$$

berechnet. Die Einheit der Fläche ist eine Leistung bezogen auf das gescherte Volumen. Multipliziert man diese Leistung mit der Scherzeit, also der Zeit, in der die Flüssigkeit geschert wurde, ergibt dies eine Arbeit, die nötig ist, um die thixotrope Struktur der Bindungskräfte der Flüssigkeit aufzubrechen.



**Abbildung 28:** Viskositätskurve einer thixotropen Flüssigkeit. Während der Aufwärtsrampe (I) sinkt die Viskosität, diese nimmt anschließend in der Abwärtsrampe (II) wieder zu (nach [2]).



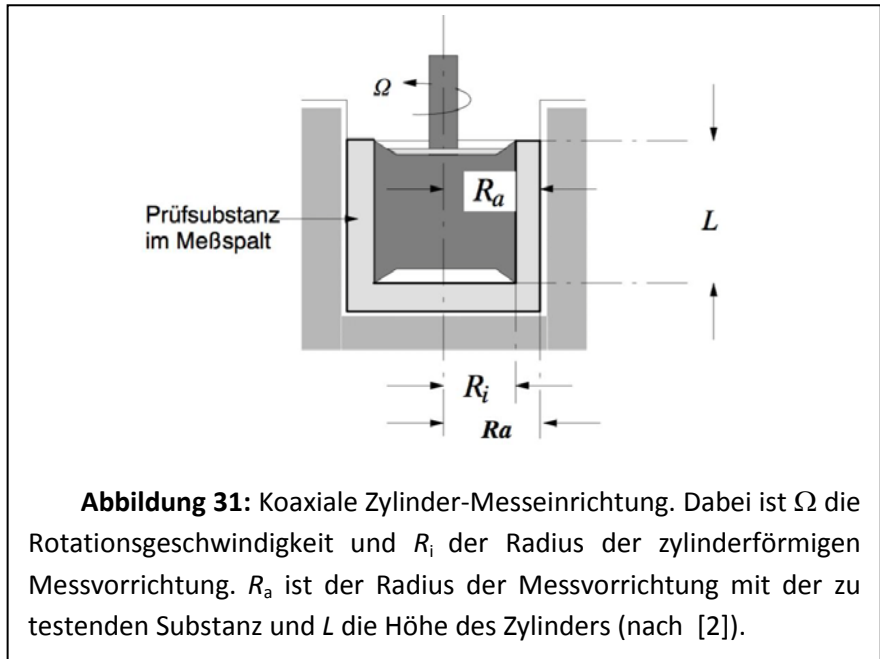
**Abbildung 29:** Fließkurve einer thixotropen Flüssigkeit. Dabei ist die Schubspannung  $\tau$  gegen die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  aufgetragen. Die Aufwärtsrampe (I) und die Abwärtsrampe (II) schließen die Hystereseffläche  $A'$  ein (nach [2]).

### 3 Verschiedene Arten von Rheometern

Es gibt verschiedene Messgeräte – Rheometer - zur Messung der Viskosität. Diese unterscheiden sich außer in den technischen Spezifikationen (z.B. luftgelagerte Achsen) auch in der Geometrie der Messvorrichtungen. Im Folgenden werden kurz die drei gebräuchlichsten Messgeometrien vorgestellt. Es wird jedoch nicht darauf eingegangen, wie die einzelnen Rheometer ihre Messungen aufnehmen und auch auswerten. Darauf wird auf weiterführende Literatur der jeweiligen Hersteller verwiesen.

### 3.1 Koaxiale Zylinder-Messeinrichtung

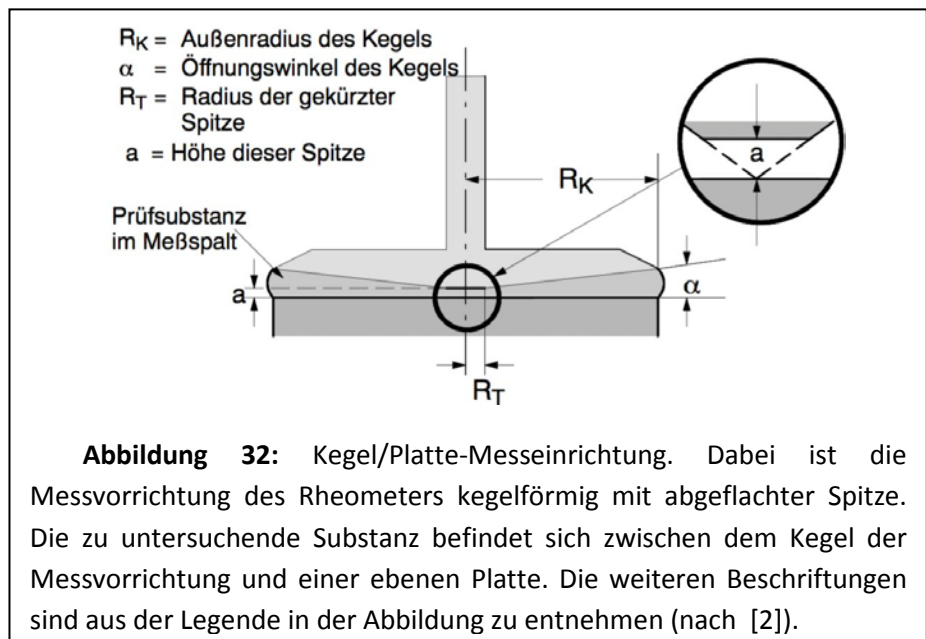
In Abb. 31 ist die sogenannte koaxiale Zylinder-Messeinrichtung zu sehen. Dabei wird in ein zylinderförmiges Gefäß die zu untersuchende Substanz eingefüllt, anschließend wird die ebenso zylinderförmige Messvorrichtung des Rheometers in das Gefäß gesteckt, bis es keine Lufteinschlüsse mehr zwischen der zu untersuchenden Substanz und der Messvorrichtung mehr gibt. Anschließend rotiert - je nach gewünschter Messung - der Zylinder des Rheometers mit der Kreisfrequenz  $\Omega$ .



**Abbildung 31:** Koaxiale Zylinder-Messeinrichtung. Dabei ist  $\Omega$  die Rotationsgeschwindigkeit und  $R_i$  der Radius der zylinderförmigen Messvorrichtung.  $R_a$  ist der Radius der Messvorrichtung mit der zu testenden Substanz und  $L$  die Höhe des Zylinders (nach [2]).

### 3.2 Kegel/Platte-Messeinrichtung

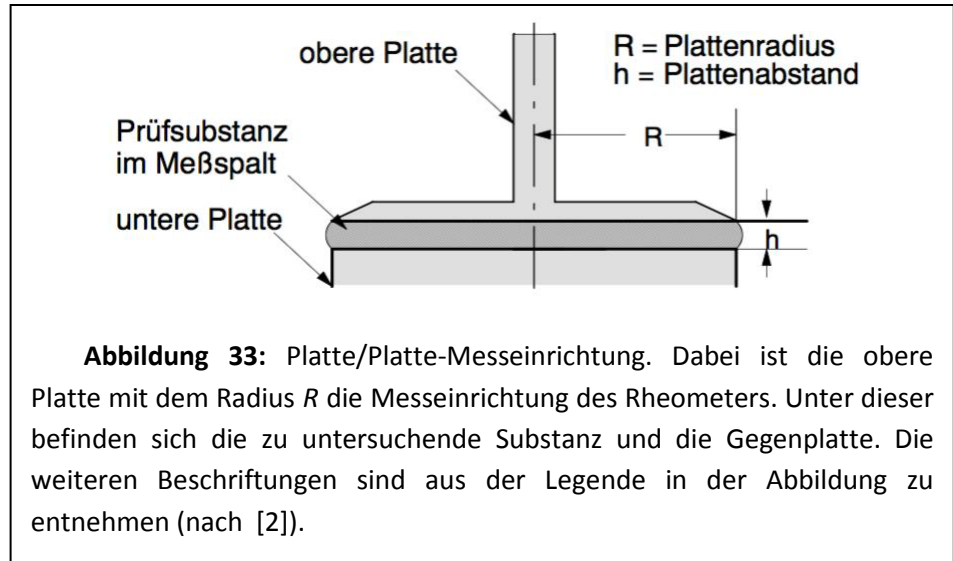
In Abb. 32 ist ein schematischer Aufbau einer Kegel/Platte-Messeinrichtung zu sehen. Der Name rührt daher, dass die Messvorrichtung des Rheometers kegelförmig ist und diese bei der Messung auf einer ebenen Platte aufliegt. Der Kegel ist dabei an seiner Spitze abgeflacht und liegt eben auf der Platte auf. Zwischen dem Kegel und der Platte befindet sich die zu messende Substanz.



**Abbildung 32:** Kegel/Platte-Messeinrichtung. Dabei ist die Messvorrichtung des Rheometers kegelförmig mit abgeflachter Spitze. Die zu untersuchende Substanz befindet sich zwischen dem Kegel der Messvorrichtung und einer ebenen Platte. Die weiteren Beschriftungen sind aus der Legende in der Abbildung zu entnehmen (nach [2]).

### 3.3 Platte/Platte-Messeinrichtung

In Abb. 33 ist ein Aufbau der Platte/Platte-Messeinrichtung skizziert. Dabei liegt die obere rotierende Platte des Rheometers auf einer zweiten parallel verlaufenden Platte auf. Zwischen diesen beiden Platten befindet sich die zu untersuchende Substanz, welche durch Rotation der oberen Platte geschert wird.



## 4 Vorgeschlagener Versuchsablauf

In diesem Kapitel wird ein Versuchsablauf mit dem HAAKE Viscotester iQ von Thermo SCIEN-TIFIC, sowie mögliche Fragen zur Ausarbeitung vorgestellt. Die zu untersuchende Substanz ist Ketchup. Ziel dieses Versuchs ist, die Zeitabhängigkeit eines thixotropen Stoffes (Ketchup) zu untersuchen.

### Versuchsdurchführung

1. Einschalten des Viskosimeter: Den Netzstecker des Viskosimeter einstecken und das Viskosimeter durch Betätigen des Kippschalters einschalten. Anschließend fährt dieses hoch (dauert ca. 2 min).
2. Vorbereiten der Messung: Zuerst wird der Becher durch eine Drehung (ca.  $\frac{1}{3}$ ) entrastet und nach oben weg ziehen. Dann den Becher mit ungefähr 10ml Ketchup füllen (Achtung: Ketchup nicht allzu sehr bewegen) und wieder in das Viskosimeter einsetzen und wieder fixieren. Anschließend den Messkopf einsetzen. Dazu muss der Gerätekopf in oberster Position sein (überprüfen!) und den Messkopf senkrecht in die Schnellkupplung schieben, bis dieser einrastet.
3. Ablauf der Messung: Der Gerätekopf wird durch das Drücken des Klemmhebels in Richtung des Handrads und durch vorsichtiges Drehen dieses, bis zur tiefsten Stelle gebracht. Dort kann das Viskosimeter seine Messungen vornehmen. Nun wird auf dem Touchscreen unter dem Menü **Job control** der Job **Yield Point (CR)** mit den Cursortasten ausgewählt und die Messung mit der Starttaste gestartet. Für die Auswertung werden die Ergebnisse benötigt, deshalb die vier Seiten, die oben am Bildschirm auswählbar sind, fotografieren. Anschließend wird im Job-Menü die Messung **Thixotropy Loop** gewählt und gestartet. Wieder werden die Ergebnisse für die Auswertung fotografiert. Nach diesen beiden Messungen, werden diese zwei Messungen nach demselben Schema noch einmal durchgeführt.
4. Abbau und Säubern: Zuerst wird das Viskosimeter ausgeschaltet und ausgesteckt. Zum Säubern des Messkopfes muss der Gerätekopf in die höchst mögliche Position gebracht



(Klemm-hebel drücken und das Handrad drehen) werden. Anschließend die Hülse der Schnellkupplung nach unten drücken und den Messkopf festhalten (darf nicht runter fallen) und entnehmen. Bei der Reinigung darf die obere Hälfte des Messkopfes nicht nass werden! Anschließend den Becher entnehmen, reinigen und wieder einsetzen.

## Fragen zum Versuch

1. Um was für eine Art von Viskosimeter handelt es sich?
2. Warum darf der Ketchup beim Einfüllen nicht zu zu sehr verformt werden?
3. Was wird bei den zwei verschiedenen Messungen bestimmt?
4. Die unteren Kurven der **Thixotropy Loop** werden miteinander verglichen und unter Zuhilfenahme des **Yield Points** diskutiert.

## Literatur

- [1] Dr.-Ing. Robert Bordas. Vorlesungsskript Rheologie. <http://www.uni-magdeburg.de/isut/LSS/Lehre/Vorlesungsscript.pdf>. Abgerufen am 25.03.16.
- [2] Gebhart Schramm. Einführung in die Rheologie und Rheometrie. Thermo Electron GmbH, Karlsruhe, 2. Aufl. edition, 2004.
- [3] Chemie.de. Definition Rheologie. <http://www.chemie.de/lexikon/Rheologie.html>. Abgerufen am 25.03.16.
- [4] Thermo Fischer Scientific. Einführung in die Viskosimetrie und Rheologie, Gfand Begri - tationsversuch. Powerpoint Präsentationsfolie.