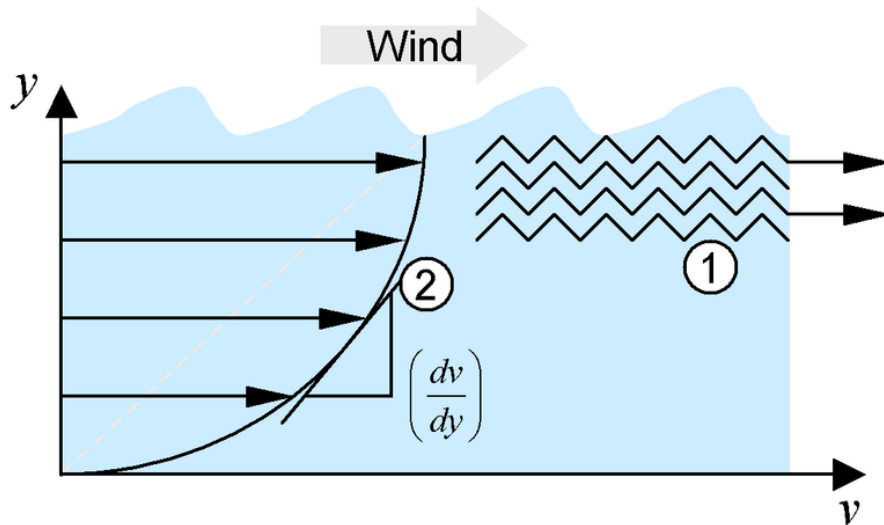


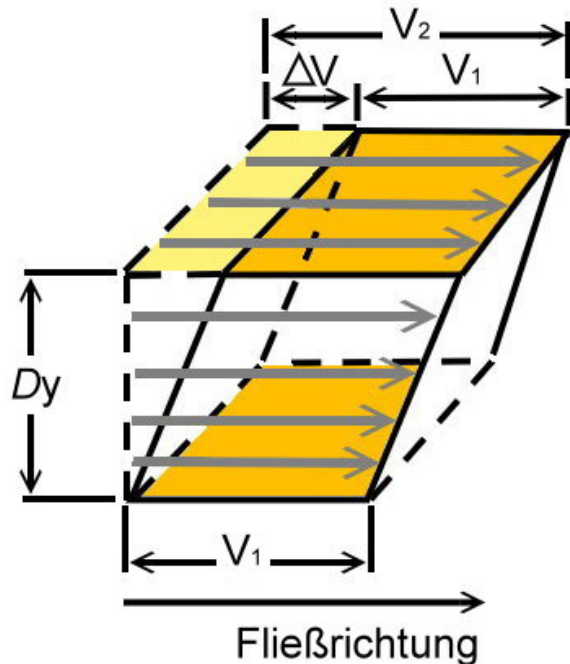
4 Kennwerte für Kraftstoffe

4.4 *Fließverhalten*



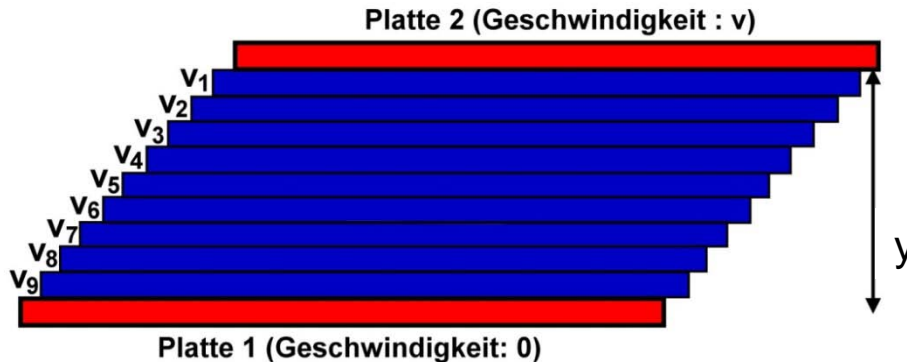
- Wind gleitet über Wasser eines Ozeans → erzeugt Bewegung der Wasserschicht an der Oberfläche → je tiefer man taucht, desto ruhiger wird das Wasser → bis zu dem Punkt, wo keine Strömung mehr auftritt → Fazit: Flüssigkeitsschichten bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit → **Geschwindigkeitsgradient!**
- weht kein Wind mehr → bricht die Strömung zusammen → Wasser ruht auch wieder an der Oberfläche. Dass die Flüssigkeit in tieferen Schichten praktisch ruht ist Folge der **inneren Reibung** in der Flüssigkeit, **der Viskosität!**

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>



$$D_1 = \frac{V_2 - V_1}{\Delta y} = \frac{dv}{dy} \left[s^{-1} \right]$$

- V_1 = Fließgeschwindigkeit im Abstand null
- V_2 = Fließgeschwindigkeit im Abstand y
- Zwischen 2 Platten mit der Fläche A im Abstand y befindet sich eine Flüssigkeit
- Die obere Platte wird mit der Kraft F mit der Geschwindigkeit V_2 von links \rightarrow rechts bewegt
- Untere Platte hat eine kleinere Geschwindigkeit V_1 \rightarrow dadurch bewegen sich die einzelnen Flüssigkeitsschichten in laminarer stationärer Strömung mit unterschiedlicher V
- Es gilt:
Schergefälle: Die Haftung der Flüssigkeit an der Platte mit geringer Geschwindigkeit ruft ein Geschwindigkeits- o. Schergefälle senkrecht zur Bewegungsrichtung hervor, das als Verhältnis von Geschwindigkeitsunterschied- und abstand ist



$$F \sim A \text{ und } F \sim v \text{ und } F \sim \frac{1}{y}.$$

Hieraus ergibt sich und als Gleichung

$$F \sim \frac{A v}{y} \quad F \sim \eta \frac{A v}{y}.$$

Im Experiment lässt sich zeigen, dass die Kraft F , die nötig ist, um Platte 2 zu bewegen direkt proportional zu ihrer Fläche A , ihrer Geschwindigkeit v und antiproportional zu dem Abstand der Platten y ist:

Ein Stoff hat also die Viskosität 1 Ns/m^2 , wenn bei einer Größe der Platten von 1 m^2 und einem Plattenabstand von 1 m eine Kraft von 1 N benötigt wird, um die Platten mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s gegeneinander zu verschieben.

Für die physikalische Einheit gilt:

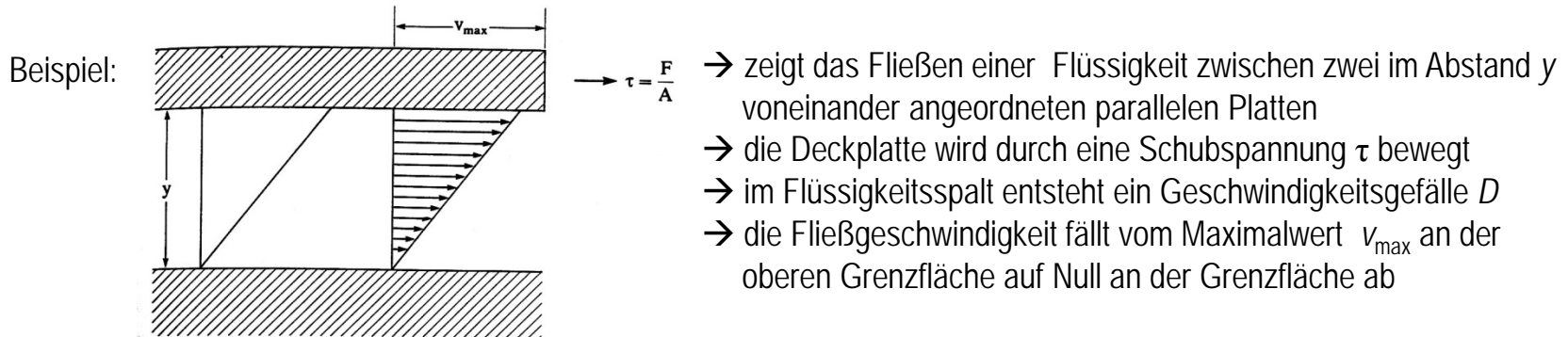
$$1\text{N} = [\eta] \cdot \left(\frac{\text{m}^2 \text{ m}}{\text{m s}} \right) \Rightarrow [\eta] = \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}.$$

$$[\eta] = \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} = \text{Pa} \cdot \text{s} = \frac{\text{N s}}{\text{m}^2}$$

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>

Die **Viskosität** ist ein Maß für die **Zähflüssigkeit** eines Fluids.

Je größer die Viskosität ist, desto dickflüssiger, d. h. weniger fließfähig ist das Fluid, weil seine Teilchen desto stärker aneinander gebunden und damit unbeweglicher sind. Man spricht daher auch von der **inneren Reibung**.



→ in diesem Modell ist das Geschwindigkeitsgefälle linear!

$$\text{Gleichung: } D = \frac{v_{\max}}{\gamma}$$

$$\text{Einheit: } [D] = \frac{\text{m s}^{-1}}{\text{m}} = \text{s}^{-1}$$

→ das Geschwindigkeitsgefälle ist der angreifenden Schubspannung proportional

$$\tau = \eta D \quad \text{Fließgesetz von Newton}$$

→ der Proportionalitätsfaktor ist die dynamische Viskosität η der Flüssigkeit, ihre **SI-Einheit ist Pas (Pascalsekunde)**
 Umrechnungsfaktoren $0,1 \text{ Pas} = 1 \text{ Poise} = 1 \text{ g/cms}$

- Darüber hinaus wird das Verhältnis zwischen der dynamischen Viskosität η und der Dichte ρ definiert als **kinematische Viskosität**:

$$\text{kinematische Viskosität } (\nu) = \frac{\text{dynamische Viskosität } (\eta) \text{ g/cms}}{\text{Dichte } (\rho) \text{ g/cm}^3} \text{ in cm}^2/\text{s}$$

- **SI-Einheit** der kinematischen Viskosität ist **m²/s**
- alte Einheit: Stokes (St) Umrechnung: 1 St = 10⁻⁴ m²/s bzw. 1 cSt = 1 mm²/s
- In der Kraftstoffprüfung spielen Viskositätsangaben nur bei Dieselmotoren, bei Turbinen- und Düsenkraftstoffen, vor allem beim Betrieb mit Rückstandsölen in langsamlaufenden Dieselmotoren eine Rolle
- In Deutschland wurde die Viskosität früher mit dem Engler-Gerät nach DIN 51560 bestimmt
→ gibt die Viskosität des Kraftstoffes im Vergleich zu derjenigen von Wasser bei 20°C an, d.h.

$$\text{Engler-Viskosität bei } t^\circ \text{ Temperatur des Kraftstoffes} = \frac{\text{Ausflusszeit von 200 ml Kraftstoff bei } t^\circ \text{C}}{\text{Ausflusszeit von 200 ml Wasser von } 20^\circ \text{C}} \text{ in Engler-Graden } (^\circ \text{E})$$

- Die dynamische Viskosität der meisten Flüssigkeiten nimmt mit steigender Temperatur ab und kann oft mit der Arrhenius-Andrade-Beziehung beschrieben werden:

$$\eta = \eta_0 e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}}$$

- Wobei η_0 eine Materialkonstante und E_A die Aktivierungsenergie (auch Platzwechselenergie), R die allgemeinen Gaskonstante und T die absolute Temperatur sind.

- Bestandteil von Kraft- und Brennstoffnormen (z. B. DK, Biodiesel, Rapsöl, Heizöl)
- Klassifizierung Rückstandkraftstoffe für die Seeschifffahrt,
- Qualität der Kraftstoffaufbereitung, Zerstäubbarkeit
- Kraftstoffumschlag, Pumpbarkeitsviskosität
- Schmierstoffe Durchölungsgeschwindigkeit
- Erkennen von Verunreinigungen
- V-T-Verhalten, Ermittlung der Vorwärmtemperatur bei Rückstandkraftstoffen, Verhalten bei tiefen Temperaturen

Typische Viskositätswerte von Flüssigkeiten

Substanz	η in mPa·s ¹⁾
Wasser (5 °C)	1,52
Wasser (20 °C)	1,00
Wasser (25 °C)	0,891
Petroleum	0,65
Pentan (25 °C)	0,224
Diethylether	0,240
Hexan	0,320
Heptan	0,410
Octan	0,538
Nonan	0,711
Chloroform	0,56
Decan	0,920
Dodecan	1,52
Ethanol	1,19
Essigsäure (80%-ige bei 25°C)	2,31
Benzol (25 °C)	0,601

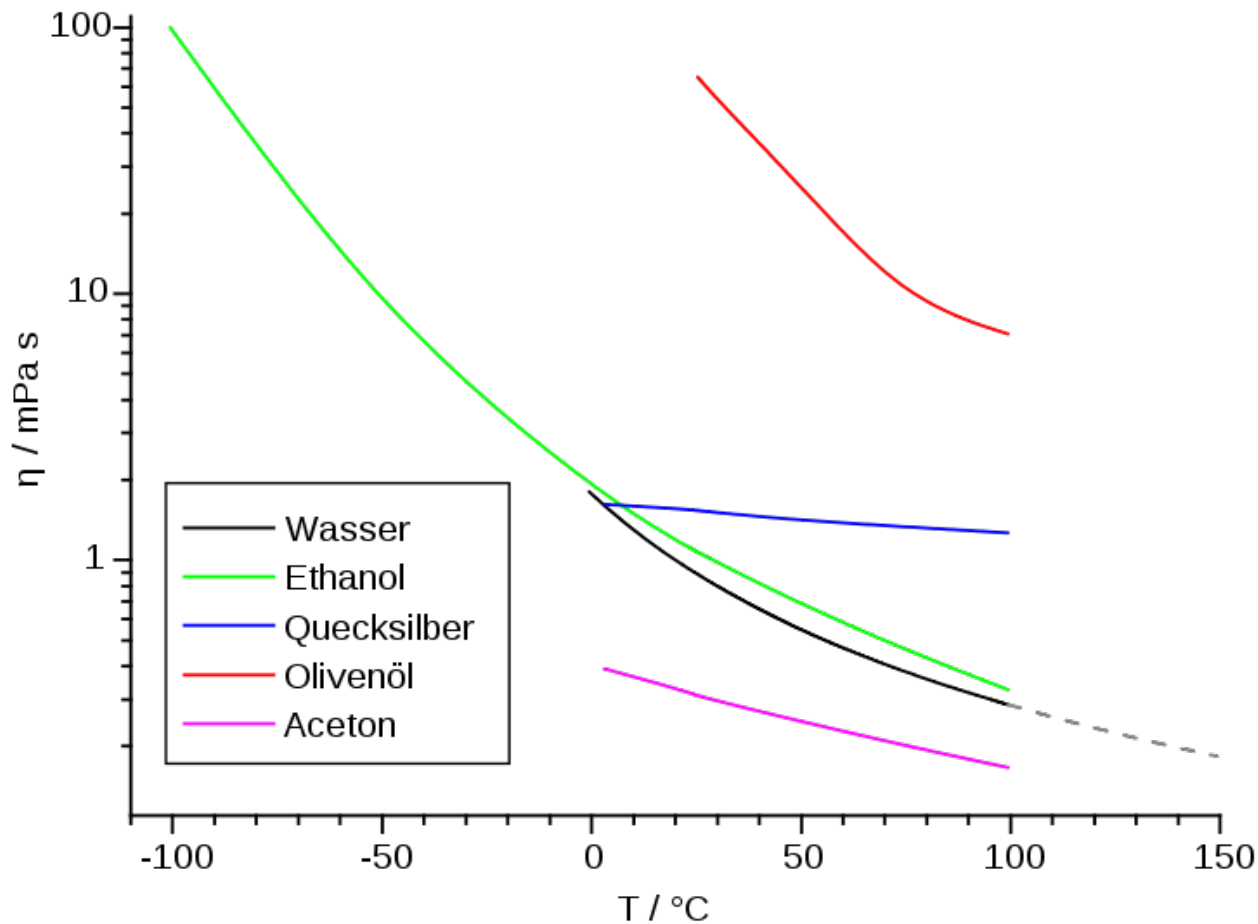
Substanz	η in mPa·s ¹⁾
Glycerin (rein)	1480
Lack	$\sim 10^2$
Paraffinöl	10^2 bis 10^6
Polymerschmelzen	10^3 bis 10^{13} ²⁾
Bitumen	$\sim 10^{11}$
Asphalt	$\sim 10^5$
Quecksilber	1,55
Glas (Verarbeitungstemperatur)	$\sim 10^2$ bis 10^4
Glas (Raumtemperatur)	$\sim 10^{18}$ bis 10^{20}
Blut (37 °C)	4 bis 25
Traubensaft	2 bis 5
Olivenöl	$\sim 10^2$
Honig	$\sim 10^4$
Sirup	$\sim 10^5$
Kaffeesahne	~ 10
Steinsalz	$\sim 10^{13}$ bis 10^{18}

1) Sofern nicht anders vermerkt, beziehen sich die Werte auf die Viskosität für 20 °C. $1 \text{ mPa} = 0,001 \text{ N/m}^2 = 10^{-7} \text{ N/cm}^2$

2) Bei Polymeren gibt es einen sehr breiten Bereich an Viskositäten, der im Wesentlichen von der Kettenlänge und deren Verzweigungsstruktur (und natürlich von der Temperatur) abhängt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>

Typische Viskositätswerte- verschiedener Flüssigkeiten



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>

- Vordrucke (z. B. nach Ubbelohde-Walter)

- Berechnung von Mischungsviskositäten:

$$(v_1 + v_2) \bar{w} = v_1 w_1 + v_2 w_2$$

$$\bar{w} = \lg \lg (v_n + 0,8)$$

$$w_1 = \lg \lg (v_1 + 0,8)$$

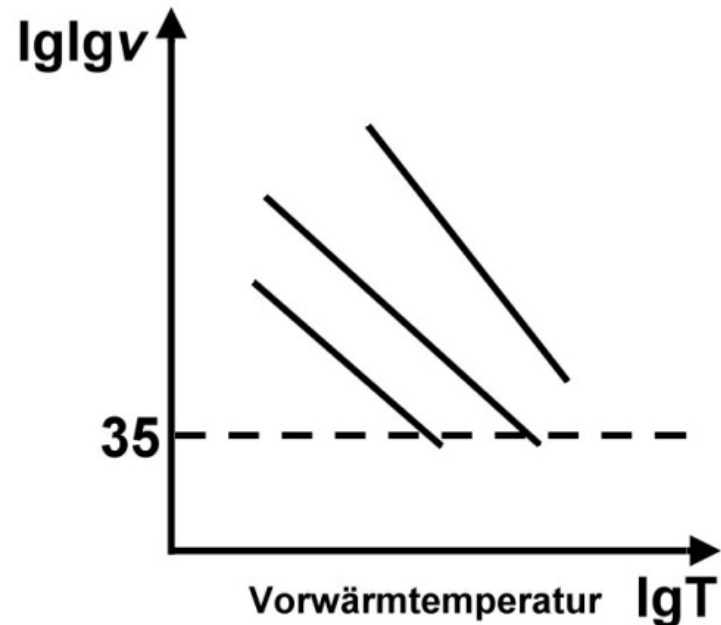
$$w_2 = \lg \lg (v_2 + 0,8)$$

$$v_1, v_2 = \text{Massenanteil}$$

- Link:

<http://www.megu.in.de/megu.in/web.nsf/formular?OpenForm&formular=mdmischverhaeltnis&lang=md#>

- Vordrucke mit doppeltlogarithmischer Achseneinteilung (z. B. nach Ubbelohde-Walter)



Gleichung nach Walter - Anwendung in DIN 51563

$$\lg \lg (\nu + 0,8) = K_1 - m \lg t$$

$$m = \frac{w_1 - w_2}{\lg T_2 - \lg T_1} \quad \Leftarrow \text{in guter Näherung gilt}$$

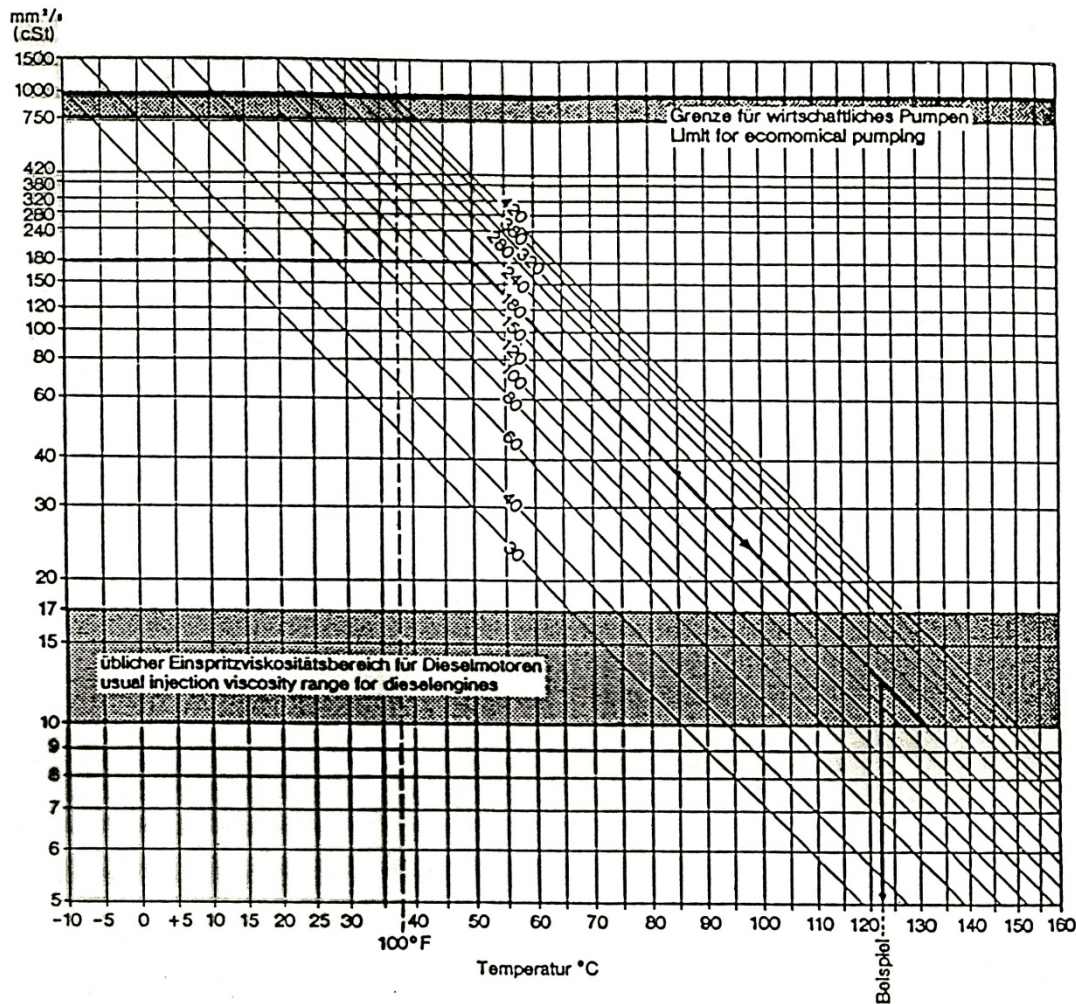
$$w = \lg \lg (\nu + 0,8) \quad \text{Extrapolation zwischen Cloudpoint} \rightarrow \text{Beginn Dampfblasenbildung möglich!}$$

ν = Zahlenwert kinematische Viskosität in mm^2/s

T = Temperatur in K

m = Richtungskonstante der VT Geraden

Quelle: O' Donnell, R. J. u. J. A. Zakarian (1984): Survey of two-parameter equations for the viscosity-temperature behaviour of lubricating oils. Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. 23, Nr. 3, S. 475/76



Dem Viskositäts-Temperaturblatt ist ein mittlerer Viskositätsindex (VI) zugrunde gelegt.

Einspritzviskositäten:

Schnellläufer: $2 - 5 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Mittelschnellläufer: $12 - 16 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Langsamläufer: $14 - 35 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Viskosität von Rückstandskraftstoffen in internationalen Einheiten

Kinematische Viskosität mm ² /s (cSt) 50°C	annähernde Viskosität Redwood I sec/100°C
Intermediate Fuel (IF)	30
	40
	60
	80
	100
	120
	150
	180
	240
	280
	320
	380
	420
460	

- Im Marine-Sektor gilt eine Bezugstemperatur von 50°C bzw. international 100°F oft noch mit der Viskositätseinheit Redwood I sec. für Rückstandskraftstoffe
- Die Viskositätsangabe für Destillatkraftstoffe erfolgt bei einer Temperatur von 40°C.
- Weitere Einheiten: E, E° Engler-Grad, R" Redwood-Sekunde, SS U, SUS–Saybolt-Universialsekunde
- Umrechnungs-Tabellen in DIN 51560, ASTM D2161

Messprinzipien zur Bestimmung der Viskosität

Kapillarviskosimeter:

- Bestimmtes Flüssigkeitsvolumen fließt unter eigenem oder zusätzlichem Fremddruck durch def. Kapillaren

Kugelfallviskosimeter/Höppler-Viskosimeter:

- Kugel rollt im geneigten Rohr in zu messender Flüssigkeit
- Kugelsatz für unterschiedliche Viskositäten

Rotationsviskosimeter:

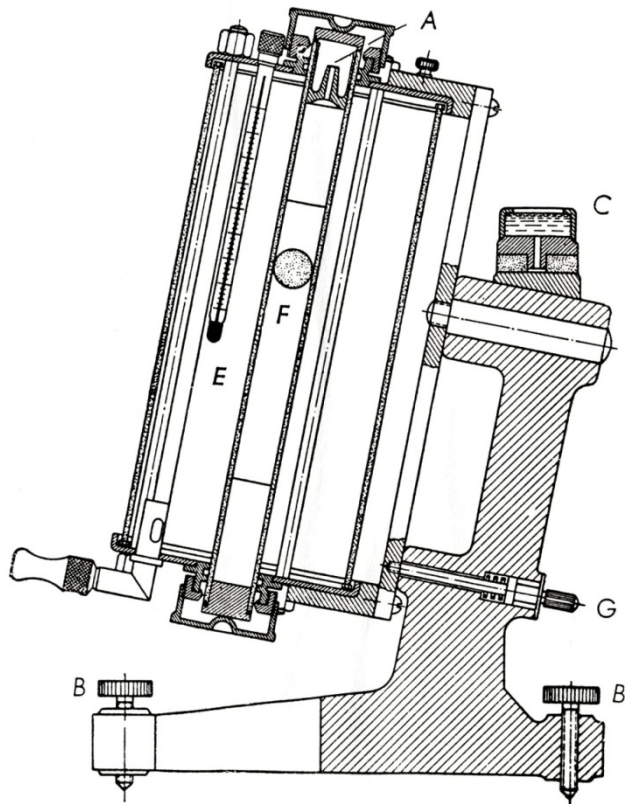
- Zwei koaxiale Zylinder → der äußere rotiert, der innere ruht → oder umgekehrt

Penetrometer:

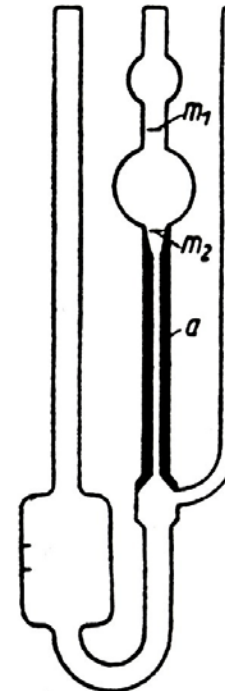
- Ermittlung des Eindringwiderstands eines Körpers, für hochviskose Flüssigkeiten, Schmierfette



Höppler- Viskosimeter



Ubbelohde-Viskosimeter



- Diesem Messverfahren liegt das Gesetz von Stokes zugrunde
- Die zu messende Flüssigkeit befindet sich in einem Messzylinder mit Radius R .
- Eine Kugel mit Radius $r < R$ fällt durch die Flüssigkeit
- Da sich bei einer von der Viskosität abhängigen Geschwindigkeit v der Kugel ein Gleichgewicht zwischen der auf die Kugel wirkenden Gravitationskraft, der Auftriebskraft und der Reibungskraft einstellt, sinkt die Kugel mit konstanter Geschwindigkeit zu Boden
- Mit dem **Stokesschen Reibungsgesetz** folgt dann für die (dynamische) Viskosität der Flüssigkeit η :

$$\eta = \frac{2 \cdot g \cdot r^2}{9 \cdot v} \cdot (\rho_K - \rho_F)$$

ρ_K Dichte der Kugel

ρ_F Dichte der Flüssigkeit

g Schwerebeschleunigung ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ an der Erdoberfläche)

v Fallgeschwindigkeit

- Durch eine Abwandlung des klassischen Couette-Rotationsviskosimeters wird eine vergleichbare Genauigkeit wie bei der kinematischen Viskositätsbestimmung ermöglicht.
- Der innere Zylinder ist hohl und spezifisch leichter als die Probe und schwimmt daher beim Stabinger Viskometer durch die Fliehkräfte zentriert frei in der Probe.
- Dadurch entfällt die sonst unvermeidliche Lagerreibung.
- Die Drehmoment- und Drehzahlmessung erfolgt berührungslos über ein rotierendes Magnetfeld und eine Wirbelstrombremse.
- Das ermöglicht eine bislang unerreichte Drehmomentauflösung von 50 pNm und einen sehr weiten Messbereich von 0,2 bis 20000 mPas mit einem einzigen Messsystem.
- Eine eingebaute Dichtemessung nach dem Biegeschwingerprinzip ermöglicht die Berechnung der kinematischen Viskosität aus der gemessenen dynamischen Viskosität nach dem Zusammenhang

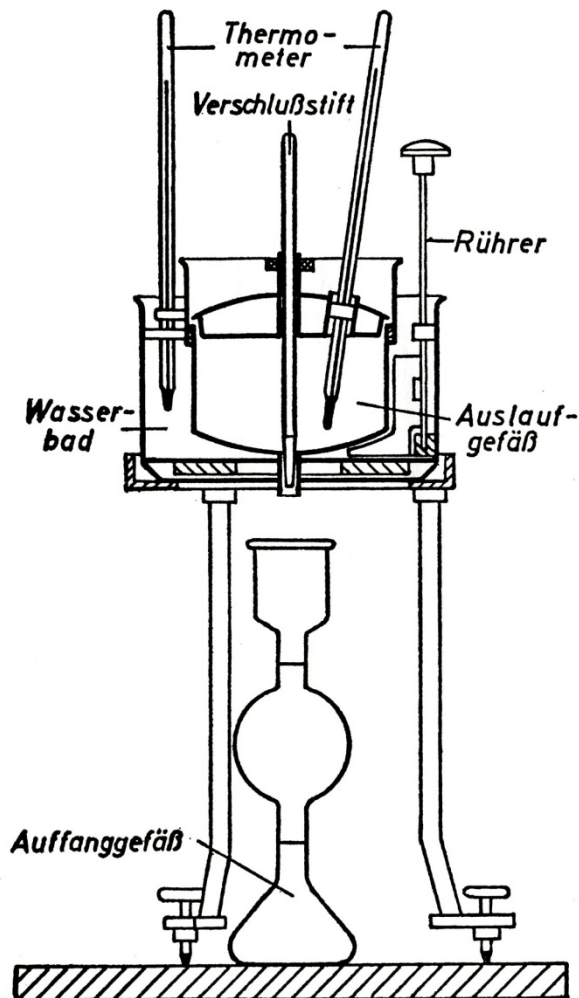
- Das zugrundeliegende Messprinzip ist hier der Fluss der zu messenden Flüssigkeit durch ein dünnes Rohr.
- Ein festgelegtes Flüssigkeitsvolumen V läuft bei gleich bleibendem Druck p durch eine Kapillare der Länge l und des Radius r und die dazu benötigte Zeit t wird gemessen.
- Die kinematische Viskosität kann dann ermittelt werden, indem man die Zeit in Sekunden mit der Konstante der Kapillare multipliziert.
- Kapillarviskosimeter sind z. B. Ubbelohde- oder Canon-Fenske-Kapillaren. Die (dynamische) Viskosität ergibt sich dann aus dem Gesetz von Hagen-Poiseuille.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} = - \frac{\pi \cdot r^4 \partial p}{8 \cdot \eta \partial z}$$

- Beim Rotationsviskosimeter wird durch einen Motor ein Körper in einer Flüssigkeit gedreht.
- Während des Drehens wird das benötigte Drehmoment gemessen.
- Daraus, sowie aus der exakten Geometrie des verwendeten Drehkörpers und des Außengefäßes, sowie der Drehgeschwindigkeit kann die dynamische Viskosität der Flüssigkeit bestimmt werden.
- Die üblichen Anordnungen für solche Geräte sind:
 - Platte gegen Platte (es handelt sich um zwei Scheiben),
 - Kegel gegen Platte und
 - Zylinder in Rohr.
- Wenn sich der Zylinder im stehenden Rohr dreht (wie bei den meisten Rotationsviskosimetern) spricht man vom Searle-Typ.
- Bei stehendem Zylinder und rotierendem Rohr handelt es sich um den Couette-Typ.



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosimeter>



Engler-Gerät zu Bestimmung der Viskosität nach DIN 51560

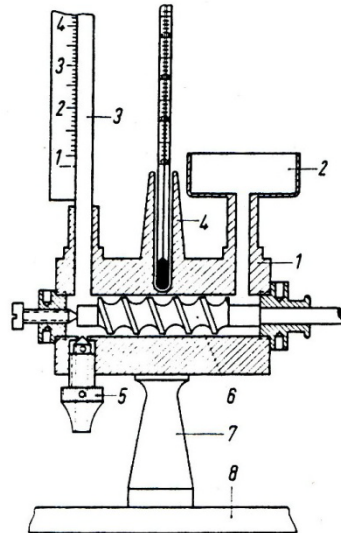


<http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosimeter>

- gibt die Viskosität des Kraftstoffes im Vergleich zu der von Wasser bei 20°C an, d. h.
- **Engler-Viskosität** bei Temperatur υ [°C] des Kraftstoffes =
$$\frac{\text{Ausflusszeit von 200 ml Kraftstoff bei } \upsilon \text{ [°C]}}{\text{Ausflusszeit von 200 ml Wasser von 20 °C}}$$

in Engler-Graden (°E)

Schnellviskosimeter nach *Dallwitz-Wegner*



- 1 Gehäuse
- 2 Ölgefäß
- 3 Meßrohr
- 4 Rohrstopfen
- 5 Ablassventil
- 6 Förderschnecke
- 7 Säule
- 8 Grundplatte

- Bestimmung erfolgt nach ASTM D-445 oder IP71
- Gute Erfahrungen im Bordbetrieb mit dem Schnellviskosimeter nach *Dallwitz-Wegner*
- Das Öl wird durch eine Schnecke in ein Meßrohr gefördert → Steighöhe im Meßrohr ist ein Maß für die Viskosität, Maßeinheit ist cSt, Gerät kann mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben werden → 3 Meßbereiche
- elektrische Heizvorrichtung und Wassermantel ermöglichen Einhaltung der Prüftemperatur
- Viskositätsangaben werden bei MGO und MDO auf 40°C, bei IF und BFO auf 50°C bezogen → Waxanteile im Kraftstoff verfälschen somit nicht die Viskosität

Viskosität von Rückstandskraftstoffen in internationalen Einheiten

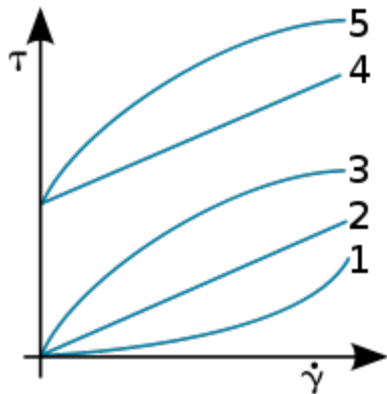
Kinematische Viskosität mm ² /s (cSt) 50°C		annähernde Viskosität Redwood I sec/100°C
Intermediate Fuel (IF)	30	200
	40	300
	60	400
	80	600
	100	800
	120	1000
	150	1200
	180	1500
	240	2000
	280	2500
	320	3000
	380	3500
	420	4000
460	4500	

- Im Marine-Sektor gilt eine Bezugstemperatur von 50°C bzw. international 100°F mit der Viskositätseinheit Redwood I sec. für Rückstandskraftstoffe
- Die Viskositätsangabe für Destillatkraftstoffe erfolgt bei einer Temperatur von 40°C
- Weitere Einheiten: E, E° Engler-Grad, R" Redwood-Sekunde, SS U, SUS–Saybolt-Universialsekunde
- Umrechnungs-Tabellen in DIN 51560, ASTM D2161

- Ist η unabhängig von der Geschwindigkeit v , so wird die Flüssigkeit als **Newtonsche Flüssigkeit** bezeichnet.
- Ein newtonsches Fluid (nach Isaac Newton) ist eine Flüssigkeit oder ein Gas, dessen Scherspannung (auch Schubspannung) τ proportional zur Verzerrungsgeschwindigkeit (besser Schergeschwindigkeit) dv/dy ist

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$$

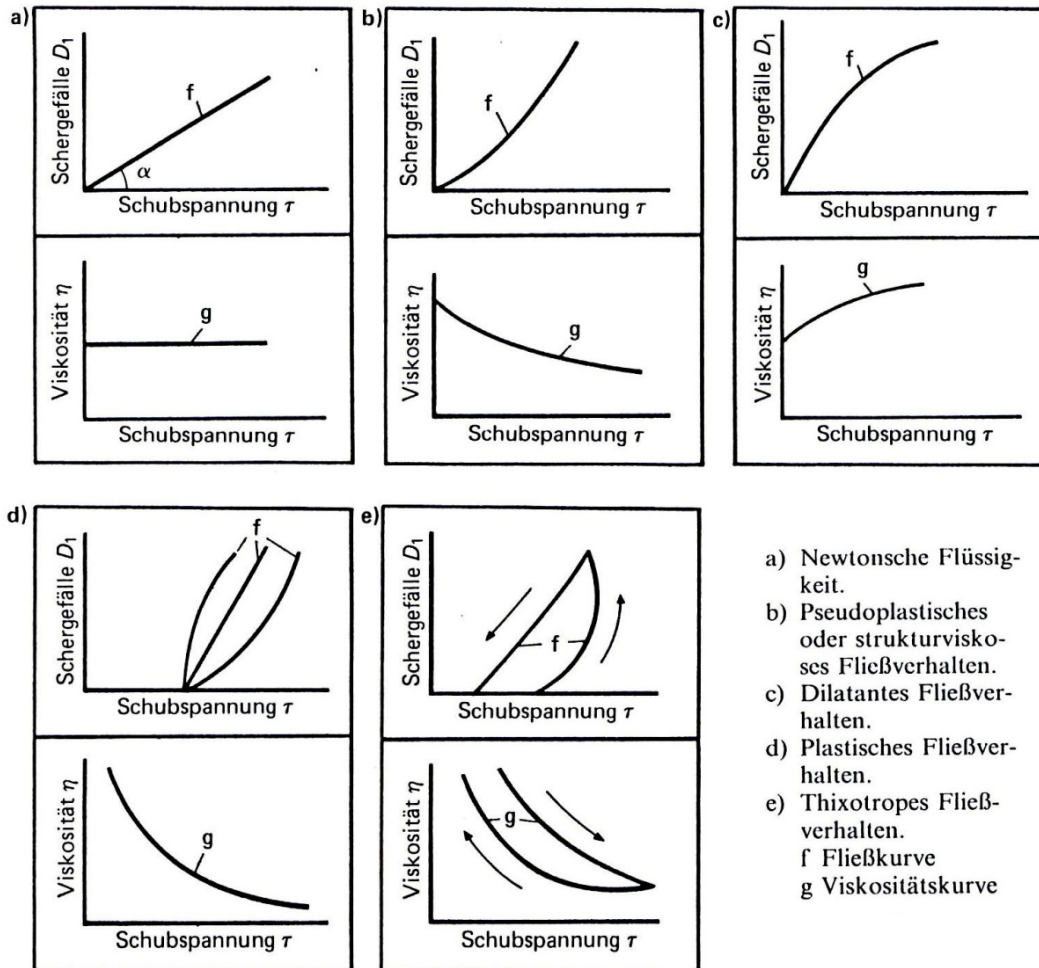
- Ist η von v abhängig, so bezeichnet man die Flüssigkeit als nicht newtonsch.



- 1: dilatantes Fluid
- 2: Newtonsches Fluid
- 3: Pseudoplastisches Fluid
- 4: Bingham-plastisches Fluid
- 5: Casson-plastisches Fluid

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>

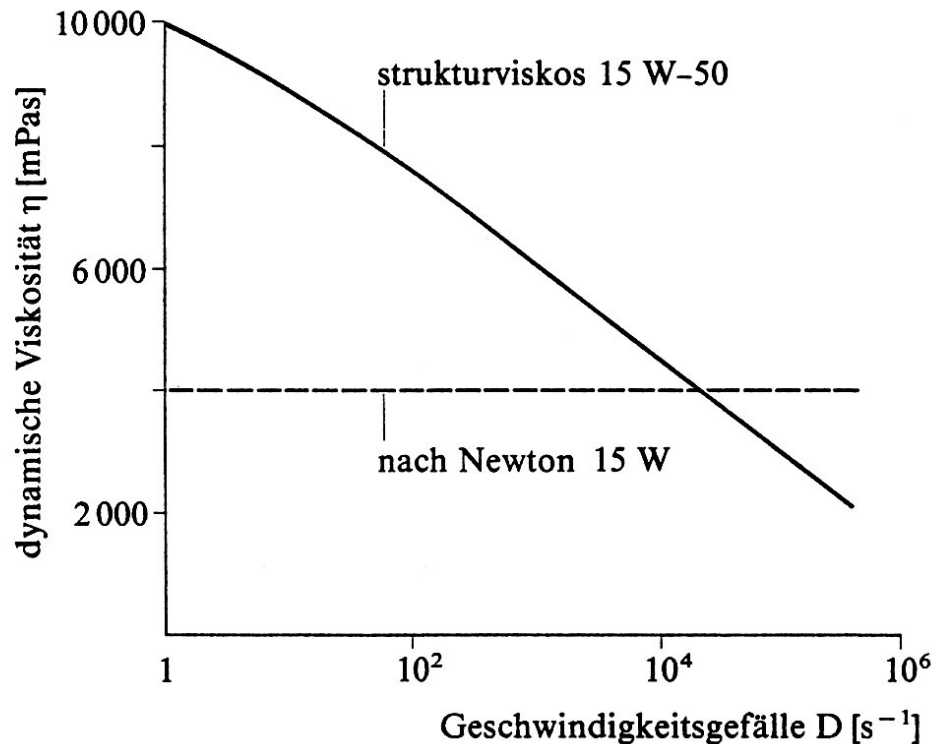
Formen des Fließverhaltens



- a) Newtonsche Flüssigkeit.
 - b) Pseudoplastisches oder strukturviskoses Fließverhalten.
 - c) Dilatantes Fließverhalten.
 - d) Plastisches Fließverhalten.
 - e) Thixotropes Fließverhalten.
- f Fließkurve
g Viskositätskurve

Quelle: Möller, Bohr: Schmierstoffe im Betrieb

Viskositätskurven von Motorenölen bei -20°C



- Bei vielen zäheren Flüssigkeiten hängt die Viskosität gleichzeitig von der **Schubspannung** ab, bei der sie gemessen wird.
- Substanzen, bei denen die Viskosität mit steigender Schubspannung abnimmt, nennt man pseudoplastisch oder strukturviskos.
- z.B. Mehrbereichs Motorenöle mit VI-Verbesserern, Schmierfette, Bitumen