

Das Kälteverhalten von Schmierölen.

Von Dr. J. Hennenhöfer, PTR.

A. Die Zähigkeit als Stoffkonstante.

Der Koeffizient der inneren Reibung, kurz mit Zähigkeit bezeichnet, ist definiert durch den Newton'schen Ansatz. Dieser besagt, daß die Schubspannung τ zwischen zwei in der Strömungsrichtung liegenden benachbarten parallelen Schichten vom Abstand dy proportional ist dem Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur Strömungsrichtung $\frac{dv}{dy}$. Der Proportionalitätsfaktor η ist die dynamische Zähigkeit:

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

Unter Voraussetzung einer parabolischen Geschwindigkeitsverteilung ergibt die Integration des Ansatzes für die Kapillarströmung, bei der anstelle der benachbarten Flüssigkeitsschichten zwei benachbarte Flüssigkeitszylinder vom Abstand dr betrachtet werden, das bekannte Poiseuillesche Gesetz:

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot t}{8 V l} P$$

Zur Analyse des Fließverhaltens eines Stoffes trägt man gewöhnlich entsprechend dem Newtonschen Ansatz die Geschwindigkeitsgradienten $\frac{dv}{dr} = D$ über der Schubspannung auf und untersucht das erhaltene Kurvenbild, die Fließkurve. Im allgemeinen entspricht nun das Fließverhalten aller Flüssigkeiten dem Newtonschen Ansatz mit der Forderung einer konstanten Zähigkeit. Die Flüssigkeiten ergeben im $D - \tau$ - Diagramm eine durch den Koordinatenanfangspunkt gehende Gerade und ihre Zähigkeit ergibt sich aus dem ctg des Neigungswinkels α . (Das Arbeiten bei konstanter Temperatur ist vorausgesetzt). (Abb. 1)

Die Zähigkeit ist somit als Stoffkonstante definiert, sie ist unabhängig von den Versuchsbedingungen, von den Abmessungen des Meßgerätes und unabhängig davon, in welcher Art man die Versuchsflüssigkeit vor der Messung mechanisch oder thermisch behandelt.

Das bisher Gesagte gilt im gleichen Maße für das Verhalten von Schmierölen im Bereich normaler Temperaturen. Man kann ihre Zähigkeit in jedem beliebigen Kapillar-, Rotations- oder Kugelfallviskosimeter ohne Schwierigkeit bestimmen und erhält als Fließkurve eine Gerade durch den Nullpunkt. Die Kenntnis der Zähigkeit ist auch gerade bei Schmierölen besonders erwünscht, weil die Zähigkeit als hydrodynamisch maßgebende Stoffeigenschaft das Verhalten der Öle in Lagern und Leitungen kennzeichnet.

B. Allgemeines über das Fließverhalten der Öle bei tiefen Temperaturen.

In Bezug auf die Zähigkeitsmessungen ändern sich die Verhältnisse jedoch grundsätzlich, wenn man ein Öl auf eine tiefere Temperatur, z.B. -20° abkühlt und dann versucht, seine Zähigkeit etwa in einem Vogel-Ossag-Viskosimeter zu messen. Bei einem solchen Versuch lassen sich folgende Erscheinungen beobachten:

1. Das Öl kann nur mit einem erheblichen Überdruck durch die Kapillare in die Ausgangsstellung gebracht werden und es fließt auch nicht infolge der Schwerkraft zurück. Damit hat das Öl schon die charakteristische Eigenschaft der Flüssigkeit, die freie Verschiebbarkeit der Flüssigkeitselemente, verloren, es hat eine bestimmte Fließfestigkeit, die natürlich die Bestimmung der Zähigkeit beeinflussen wird.

2. Mit Hilfe eines Überdruckes läßt sich nun die Zähigkeitsmessung trotzdem durchführen und aus der Druck-Volumen-Zeit-Beziehung nach dem Poiseuilleschen Gesetz ein bestimmter Zähigkeitswert berechnen. Wird der Versuch unmittelbar im Anschluß an diese Messung wiederholt, dann findet man einen anderen, kleineren Wert für die Zähigkeit. Bei einer dritten Messung wird die Zähigkeit wiederum kleiner usw. Also ist die Zähigkeit abhängig geworden von der Vorgeschichte des Öles, speziell von seiner mechanischen Vorbehandlung.

3. Wiederholt man die Messung mit der vorher erwärmten Probe bei derselben Temperatur nur mit dem Unterschied, daß die Zeit der Abkühlung eine andere war, dann ergibt sich wieder ein anderer Wert, die Zähigkeit ist abhängig von der thermischen Vorbehandlung.

4. Eine weitere Versuchsreihe, bei welcher alle Bedingungen wie eben beibehalten sind, mit Ausnahme des äußeren Druckgefälles, das variiert wird, d.h. Versuche, mit verschiedenen Schubspannungen durchgeführt, ergeben für jede Schubspannung einen anderen Zähigkeitswert; die Zähigkeit ist abhängig von der Schubspannung.

5. Die gleichen Messungen, in einem anderen Vogel-Ossag-Viskosimeter durchgeführt, etwa mit verschiedenen weiten Kapillaren, würden wieder andere Zähigkeiten ergeben, die Zähigkeit ist abhängig von den Kapillarabmessungen.

Insgesamt ist also im Gegensatz zu der für normale Flüssigkeiten gültigen Forderung $\eta = \text{konst.}$ die Zähigkeit jetzt eine Funktion der folgenden Größen:

$$\eta = f \quad (\text{mech. Vorbeh., Schubspannung, Fließgrenze, Kapill.-Abm., therm. Vorbeh.})$$

Es gibt somit keine Stoffkonstante mehr, die sich durch Messungen im Viskosimeter bestimmen ließe. Infolgedessen ist es auch falsch, in diesem Zusammenhang noch von einer Zähigkeit (d.i. eine Stoffkonstante) der Öle zu sprechen. Da nun eine passende Bezeichnung für das Fließverhalten unter den eben gekennzeichneten Bedingungen noch fehlt, andererseits den z.Zt. laufenden Bemühungen um die Festlegung eines passenden Ausdrucks nicht vorgegriffen werden soll, ist im folgenden nur noch von "scheinbarer Zähigkeit" η^s gesprochen. Dieser Ausdruck ist ziemlich neutral und wird im Schrifttum zuweilen z.B. für das Verhalten von Tonaufschlämmungen gebraucht.

Die Untersuchungen, über die im folgenden berichtet wird, sollten nun klären, in welcher Weise ein Zusammenhang zwischen der scheinbaren Zähigkeit und den einzelnen genann-

ten Versuchsbedingungen besteht.

C. Die Meßeinrichtung (Abb.2)

Das Gerät besteht aus dem Viskosimeter (a), der Volummeßeinrichtung (b), der Druckanlage (c) und dem Thermostaten (d). Aus einer Preßluftflasche strömt Luft durch ein Feinregel- und ein Überströmventil in den einen Schenkel des Viskosimeters und preßt das Öl durch die Kapillare (Druckkreis). Im anderen Schenkel wird der Ölmeniskus gehoben, verdrängt ein bestimmtes Luftvolumen, dessen Größe an dem Wege des wandernden Meßtropfens abgelesen wird. Viskosimeter und Volumenmeßeinrichtung, die sich beide in einem Thermostaten befinden, sind über den unteren Druckhahn und den oberen Meßhahn miteinander verbunden. Beide Hähne sind im Prinzip Vierwegehähne, die mit Hilfe elastischer Wellen von außen bedient werden können. Durch Drehen der Hähne um 90 bzw. 180° können Druckrichtung und Laufrichtung des Meßtropfens getrennt umgekehrt werden, sodaß sich ein Öl unter konstantem Druck beliebig oft durch die Kapillare pressen läßt, wobei gleichzeitig die Strömungszeiten gemessen werden. Die Versuche wurden in vier Kapillaren verschiedener Weite bis zu Temperaturen von -20° ausgeführt.

D. Einfluß der mechanischen Vorbehandlung.

In der folgenden Abb.3 ist das Verhalten eines paraffinfreien synthetischen Öles mit einem Zusatz von 1% Ceresin gezeigt. Aufgetragen ist die Laufzeit des Meßtropfens, die der scheinbaren Zähigkeit proportional ist, über der Anzahl der Öldurchgänge durch die Kapillare. Das Öl wurde zunächst unter der konstanten Schubspannung von rd. 1000 $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$ dauernd in entgegengesetzten Richtungen durch die Kapillare bewegt. Man erkennt, wie die Laufzeiten zuerst sehr stark, dann langsamer abnehmen und daß bis zum Punkte A noch kein stationärer Zustand erreicht ist. Für jede einzelne Messung ergäbe sich also ein anderer Wert für die scheinbare Zähigkeit. Im Punkt A wurde die Meßreihe abgebrochen und jetzt mit einer rund 4 mal größeren Schubspannung gearbeitet (Kurve II). Die

Kurve zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die erste. Der Einfluß der ersten Meßreihe macht sich insofern bemerkbar, als der steile Ast weniger ausgebildet ist. Im letzten Teil verläuft diese Kurve jedoch im Gegensatz zur ersten parallel zur Abszisse, das Fließen ist unabhängig geworden von der Zeit. Die erste Kurve ist dann im Punkte B fortgesetzt, dabei erkennt man, daß trotz der dauernden mechanischen Beanspruchung die Meßzeiten jetzt zunehmen. Nach einer 16-stündigen Pause ist Kurve I fortgesetzt worden, die nach einem kurzen abnehmenden Kurventeil schließlich in eine Parallele zur Abszisse übergeht, also ebenfalls einen stationären Zustand anzeigt.

Der gesamte Kurvenverlauf ist nun kennzeichnend für das Verhalten aller bisher gemessenen Öle, ganz gleich, ob sie paraffinfrei oder paraffinhaltig waren, sofern sie nur überhaupt Fließanomalien zeigten. Eine Erklärung für das Verhalten liegt darin: in den Ölen bildet sich während der Abkühlung ein bestimmter Ordnungszustand der Moleküle, eine Struktur, aus. Infolge der Scherung beim Durchlauf des Öles durch die Kapillare wird die Struktur bis zu einem gewissen Grade zerstört. Gleichzeitig sind aber auch dauernd wirkende Aufbautendenzen vorhanden, die, sobald das Öl in Ruhe ist, wieder einen Ordnungszustand errichten. Die Öle sind thixotrop. Da die gesamten Vorgänge in einem sehr zähen Medium stattfinden, sind Aufbau und Zerstörung in erheblichem Maße Funktionen der Zeit. Während der mechanischen Beanspruchung bildet sich allmählich für jede Schubspannung ein dynamischer Gleichgewichtszustand aus, der sich in der Kurve als stationäre Strömung ausdrückt.

E. Einfluß von Schubspannung und Fließgrenze.

Wenn nun die für verschiedene Schubspannungen, aber in einer Kapillare, erhaltenen Meßreihen zur Berechnung der scheinbaren Zähigkeit ausgewertet werden sollen, hat es natürlich nur Sinn, die Meßzeiten aus dem jeweiligen stationären Zustand, also aus dem geraden Kurventeil zu entnehmen,

da anderenfalls für jede Einzelmessung ein anderer Wert erhalten würde. Die stationären Fließwerte für verschiedene Schubspannungen, aber in einer Kapillare gemessen, sind in der folgenden Fließkurve (Abb.4) aufgetragen.

Die Fließkurve zeigt im Gegensatz zum Verhalten der Newton'schen Flüssigkeiten einen Abszissenabschnitt der erhaltenen Geraden, den man als Fließgrenze bezeichnet. Eine solche Fließkurve läßt sich also nicht mehr nach dem Newton'schen Ansatz auswerten, denn der Quotient aus Abszissen- und Ordinatenwert würde für jede Schubspannung eine andere scheinbare Zähigkeit ergeben. In fließkundlicher Hinsicht gibt die Kurve das Verhalten eines ideal plastischen Stoffes wieder, dessen Deformation durch den Bingham'schen Ansatz erklärt wird:

$$\tau - \tau_0 = \eta^* \cdot \frac{dv}{dr}$$

Bei diesen Stoffen muß ein gewisser Teil der Schubspannung nur dazu verwendet werden, die inneren Spannungen zu überwinden. Erst wenn der Wert der Schubspannung so groß wird, daß die Fließgrenze f erreicht bzw. überschritten wird, beginnt das plastische Fließen. Für die Deformation selbst steht lediglich die Schubspannung $\tau - \tau_0$ zur Verfügung. Durch den Bingham'schen Ansatz läßt sich also das Fließen der Öle durch eine Kapillare mathematisch erfassen, es ist lediglich zusätzlich die Kenntnis der Fließgrenze erforderlich. Die scheinbare Zähigkeit ist gegeben durch den ctg des Neigungswinkels der Geraden. Auf dieser Grundlage könnte also ein Meßverfahren ausgebildet werden; die Abhängigkeit der scheinbaren Zähigkeit von der Schubspannung läßt sich mit Hilfe der Fließgrenze ausschalten.

F. Einfluß der Kapillarabmessungen.

Eine Wiederholung der Messungen in Kapillaren mit anderen Abmessungen ergibt für jede Kapillare die gleichen Erscheinungen wie sie eben beschrieben wurden, aber die Ergeb-

nisse mit verschiedenen Kapillaren stimmen nicht mehr überein. Durch Eintragen der für jede Schubspannung im stationären Zustand erhaltenen Durchflußzeiten in das D- τ -Diagramm erhält man Abb. 5.

Das Fließverhalten des Öles ergibt für jede Kapillare wieder eine Gerade; die einzelnen Geraden schneiden sich jedoch in zunächst unübersichtlicher Weise. Man erhält ein klareres Bild, wenn von vornherein die Fließgrenzenwerte der Schubspannung für jede einzelne Kapillare abgezogen und nur die Schubspannungen $\tau - \tau_0$ aufgetragen werden. Abb. 6.

Die Fließkurve ist in eine Reihe von Geraden, und zwar für jede einzelne Kapillare eine bestimmte Gerade aufgespalten, d.h. für jede Kapillare ergibt sich ein anderer Wert der scheinbaren Zähigkeit, und zwar in dem Sinne, daß die scheinbare Zähigkeit mit wachsendem Kapillarradius zunimmt. Die gleiche Erscheinung ist u.a. auch an Tonpasten beobachtet worden und man hat versucht, diese als σ -Erscheinung bezeichnete Spreizung durch folgende Methodik zu berücksichtigen:

Trägt man im Falle einer Newton'schen Flüssigkeit für verschiedene Kapillaren die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $Q/\pi \cdot r^2$ über der Schubspannung τ , die für die reine Poiseuille'sche Rohrströmung gleich $P \cdot r/2 L$ ist, auf, dann ergeben sich Geraden mit den Neigungswinkeln $\sigma_1, \sigma_2, \dots \sigma_n$. Da

$$\frac{4 Q}{\pi \cdot r^3} : \frac{P \cdot r}{2 L} = \frac{1}{\eta} \quad \left(Q = \frac{V}{t} \right)$$

gilt für $\frac{Q}{\pi \cdot r^2} : \frac{P \cdot r}{2 L} = \frac{r}{4 \eta} = \sigma$

und $\frac{\sigma}{r} = \frac{1}{4 \eta}$

d.h. wenn man für eine Newton'sche Flüssigkeit σ über r aufträgt, erhält man eine durch den Nullpunkt gehende Gerade, de-

ren Neigungswinkel $1/4 \eta$ beträgt. Auch bei Stoffen, an denen man die σ -Erscheinung beobachten kann, läßt sich in manchen Fällen σ als Funktion von r durch eine Gerade darstellen, die allerdings die Ordinate im Punkt σ_0 schneidet. Die Neigung dieser Geraden ist dann ein Maß für die scheinbare Zähigkeit bezogen auf den Radius $r = \infty$.

Die Anwendung des σ -Verfahrens auf die Bestimmung der scheinbaren Zähigkeit der Öle ist in der Abb. 7 gezeigt.

Hier ist der Neigungswinkel σ über dem Kapillarradius aufgetragen und zwar für dasselbe Öl, dessen Strukturzerstörung schon gezeigt worden ist. Die Kurven sind aber keine Geraden mehr. Es sind die Isothermen für die Temperaturen (von oben nach unten) 0° , -5° , -10° , -15° , -20° . Ihre Krümmung nimmt mit fallender Temperatur zu. Man erkennt, daß auch diese Methodik nicht zu dem gewünschten Ziel führt; da keine linearen Zusammenhänge zwischen σ und r bestehen, ist eine Extrapolation auf den Radius ∞ nicht möglich.

G. Mögliche Erklärung für die σ -Erscheinung.

Es interessiert nun die Frage, auf Grund welcher Vorstellungen sich die Tatsache erklären läßt, daß die scheinbare Zähigkeit mit wachsendem Kapillarradius zunimmt. Beim Durchdrücken des Öles durch eine enge Kapillare wird offenbar der Ordnungszustand erheblich stärker gestört als bei der Strömung durch eine weite Kapillare. Der Ordnungszustand verleiht aber dem Öl den Charakter des plastischen Festkörpers, und je weiter die Ordnung zerstört ist, desto mehr entspricht das Verhalten des Öles dem einer (Newton'schen) Flüssigkeit und umgekehrt. Mit anderen Worten: durch eine enge Kapillare strömt das Öl in einem Zustand, der dem einer reinen Flüssigkeit ähnlicher ist, durch eine weite Kapillare in einem Zustand, der dem eines plastischen Festkörpers ähnlicher ist. Dabei ist der Einfluß der Zeit dadurch ausgeschaltet, daß die Messungen im Gleichgewichtszustand zwischen Aufbau- und Abbau-geschwindigkeit durchgeführt sind. Wenn diese Vorstellung stimmt, dann muß der Energieanteil, der zum Zerstören der

Struktur beim Fließen durch eine enge Kapillare benötigt wird, größer sein als der für die Strömung durch eine weite Kapillare. Dieser Energieanteil erscheint bei den Messungen als die Schubspannung der Fließgrenze τ_0 . Daher soll in der Abb.8 die Abhängigkeit der Fließgrenze vom Kapillarradius gezeigt werden:

Aufgetragen ist der zur Fließgrenze gehörige äußere Druck p über dem Kapillarradius. Die Kurven sind die Isothermen bei den Temperaturen 0° , -5° , -10° , -15° und -20° . Die Werte der Fließgrenzen nehmen mit wachsendem Kapillarradius nach einer e-Funktion ab. Sie scheinen jedoch bei sehr großem Radius nicht dem Wert 0, sondern einem Grenzwert > 0 zuzustreben. Der Kurvenverlauf steht jedenfalls in Übereinstimmung mit dem oben Gesagten.

Im Gegensatz dazu nimmt die scheinbare Zähigkeit mit wachsendem Radius nach einer e-Funktion zu, wie aus der nächsten Abb.9 zu ersehen ist, bei der die Isothermen der für jede Kapillare nach dem Bingham'Ansatz berechneten scheinbaren Zähigkeit über dem Kapillarradius aufgetragen sind.

Hier zeigt sich die Tendenz einer Abweichung vom linearen (logarithmische Darstellung) Verlauf im Bereich der tiefen Temperaturen. Die scheinbare Zähigkeit nimmt wahrscheinlich, je tiefer die Temperatur ist, umso stärker mit wachsendem Radius zu, und es besteht keine Möglichkeit, etwa auf den Radius ∞ zu extrapolieren.

In der nächsten Abb.10 ist die Fließgrenze über der Temperatur aufgetragen. Die Kurven sind im Grunde genommen ein Maß für die Zunahme des Strukturaufbaus mit fallender Temperatur.

5. Einfluß der thermischen Vorbehandlung.

Nachdem bisher die eingangs mitgeteilte Abhängigkeit der scheinbaren Zähigkeit von der mechanischen Vorbehandlung, von der Schubspannung, der Fließgrenze und den Kapillarabmes-

messungen im einzelnen behandelt worden ist, fehlen noch Mitteilungen über den Einfluß der thermischen Vorbehandlung. Die in dieser Richtung bisher unternommenen Versuche sind nicht erschöpfend, doch konnten, bis auf einen Fall, bei hinreichend langer Kühlzeit, die Ergebnisse reproduziert werden. In dem genannten einen Fall ergab sich eine Abweichung von 20% bei der kürzeren Kühlzeit. Man muß bei der Abschätzung des Kühlzeiteinflusses vor allem bedenken, daß die Ausbildung der Struktur in einem zähen Medium stattfindet, also eine ziemlich lange Zeit vergeht, bis ein Dauerzustand erreicht ist. Man darf daher die Messungen nicht schon kurz nach dem Erreichen der Versuchstemperatur beginnen. Es scheint aber so zu sein, daß sich etwa nach einigen Stunden, bei sehr tiefen Temperaturen vielleicht auch erst nach Tagen, ein stabiler Strukturzustand ausgebildet hat, der eine Reproduktion der Messungen gestattet.

I. Die Möglichkeiten praktischer Meßverfahren.

Beurteilt man auf Grund der mitgeteilten Meßergebnisse die Möglichkeit, ein Meßverfahren zur Bestimmung der scheinbaren Zähigkeit der Schmieröle bei tiefen Temperaturen auszuarbeiten, bei dem die Werte in absoluten Einheiten, also unabhängig von den Versuchsbedingungen erhalten werden, dann scheitert man an der σ -Erscheinung. Mit Rücksicht auf diese Erscheinung lautet der allgemeine Ansatz für das Fließen nicht mehr

$$\tau - \tau_0 = \eta^x \cdot \frac{dv}{d\dot{\gamma}}$$

sondern

$$\tau - \tau_0 = f(\dot{\gamma}) \cdot \frac{dv}{d\dot{\gamma}}$$

oder ganz allgemein:

$$\frac{dv}{d\dot{\gamma}} = \varphi(\tau)$$

Da anzunehmen ist, daß die Funktion $f(\dot{\gamma})$ in der zweiten Gleichung von den strukturaufbauenden Tendenzen, also von der Thixotropie abhängig ist, scheint es umso schwieriger, die Funktion durch eine geeignete mathematische Ableitung

zu bestimmen. Man muß berücksichtigen, daß die Öle keine einheitlichen Stoffe sind, sondern aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen bestehen und die Aufbaugeschwindigkeiten der einzelnen Komponenten wieder verschieden sind. Es bleibt damit nur übrig, durch Reihenuntersuchungen größeren Umfangs die Funktion $f(r)$ zu bestimmen. Weit günstiger sind die Aussichten, ein laboratoriumsmäßiges Meßverfahren zur Kennzeichnung der Fließeigenschaften von Schmierölen in der Kälte zu entwickeln, wenn man von vornherein auf die absoluten Einheiten (in Poise) verzichtet und konventionelle Einheiten zu Grunde legt. Unter diesen Voraussetzungen könnte z.B. das eben bezeichnete Verfahren angewendet werden, wenn die Messungen nur in einer bestimmten Kapillare vorgenommen und die erhaltenen Ergebnisse nicht in Poise angegeben werden. Theoretische und versuchstechnische Gründe lassen es jedoch zweckmäßig erscheinen, vielleicht auf die Kapillarströmung überhaupt zu verzichten und eine andere Meßeinrichtung zu bauen. Einmal ist die Auswertung des Kapillarverfahrens nach dem Poiseuille'schen Gesetz an eine bestimmte Strömungsform mit parabolischer Geschwindigkeitsverteilung gebunden, eine Voraussetzung, die im allgemeinen nur annähernd erfüllt ist, andererseits müßte beim Arbeiten im Bereich tieferer Temperaturen mit erheblich höheren Schubspannungen gemessen werden. Somit wäre also der äußere Druck zu steigern, wodurch Temperaturänderungen durch Kompressions- und Reibungswärme hervorgerufen würden.

Wir haben uns daher entschlossen, auf Grund der bisher gewonnenen Erfahrungen versuchsweise ein neues Gerät nach anderen Gesichtspunkten zu entwickeln.

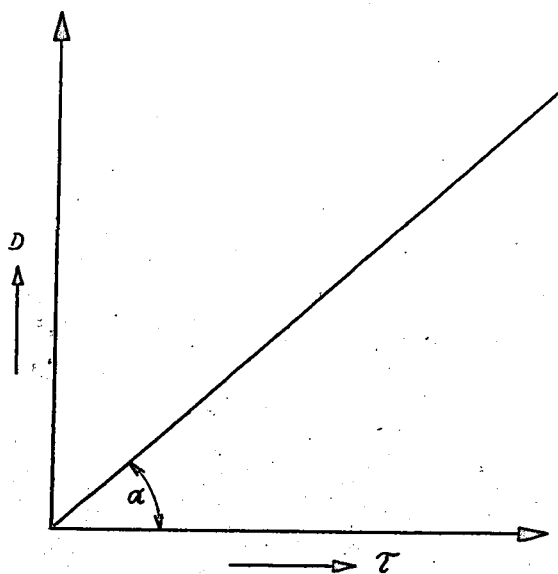


Abb. 1: Fließkurve einer Newton'schen Flüssigkeit.

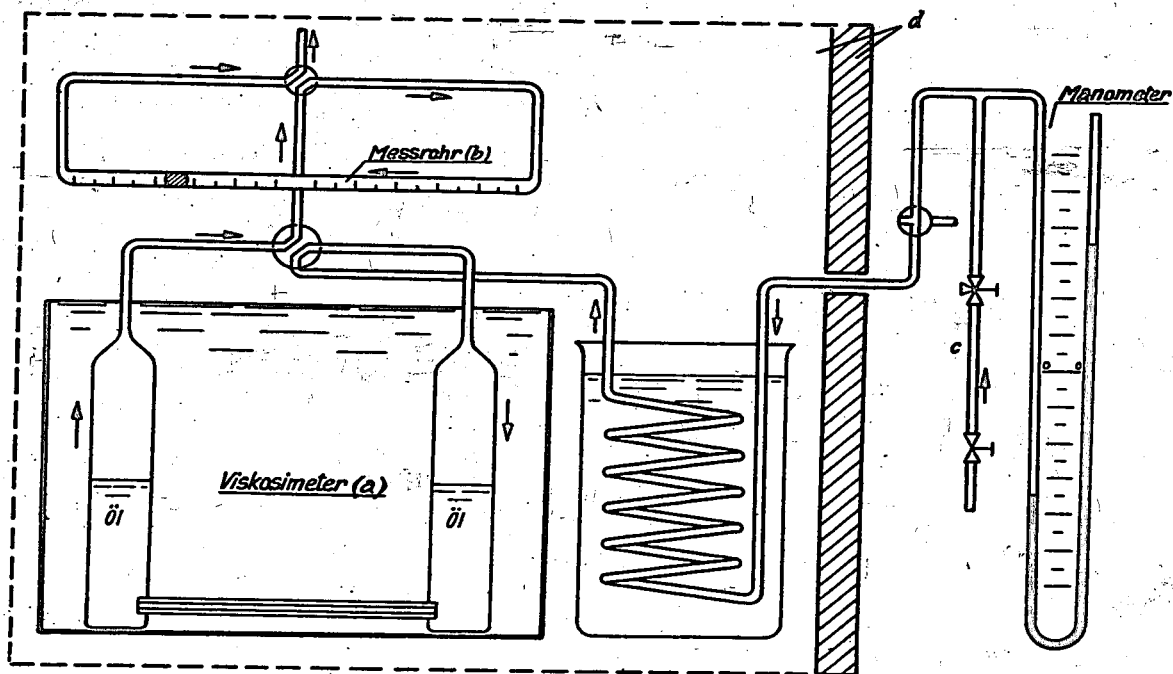


Abb. 2: Meßeinrichtung

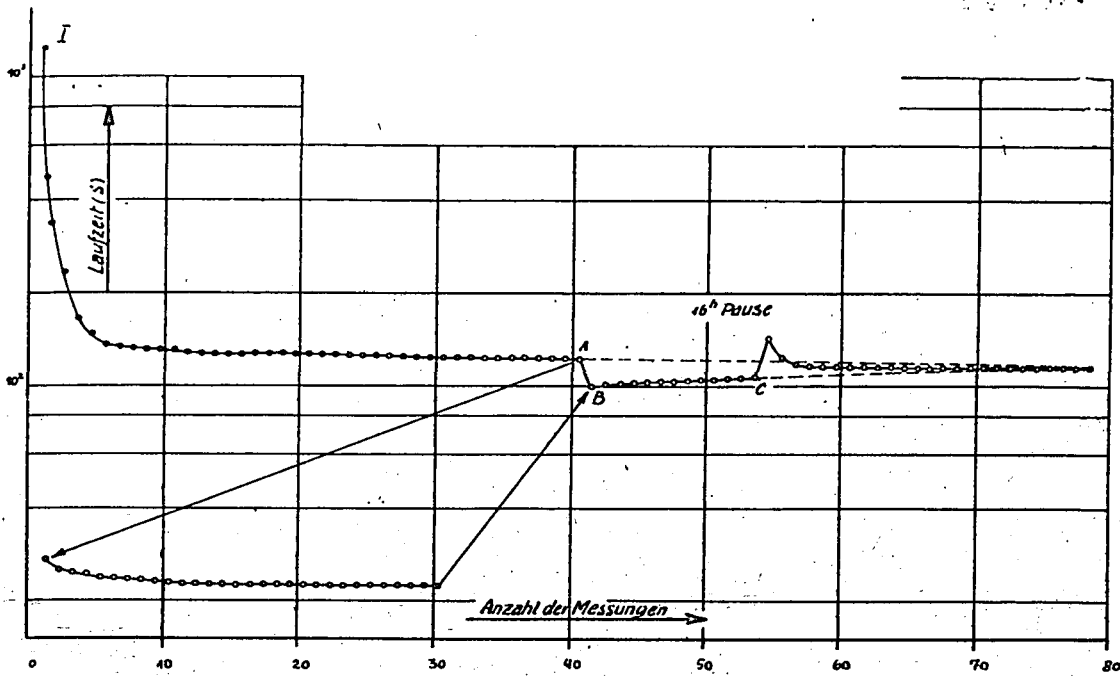


Abb.3: Anlaufvorgang bei konstanten Schubspannungen.

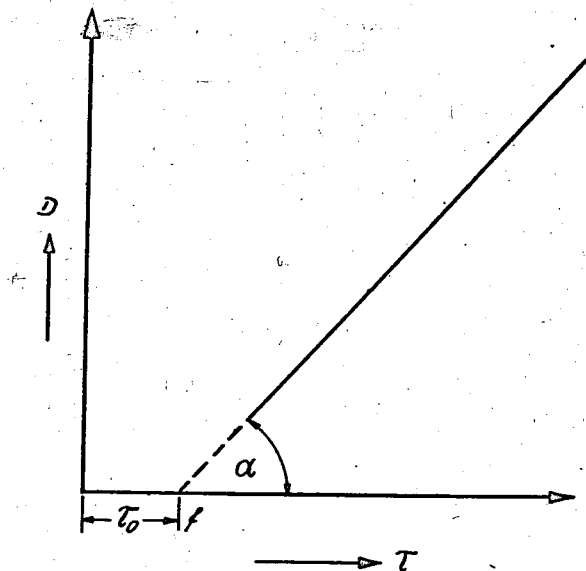


Abb.4: Fließkurve eines plastischen Stoffes.

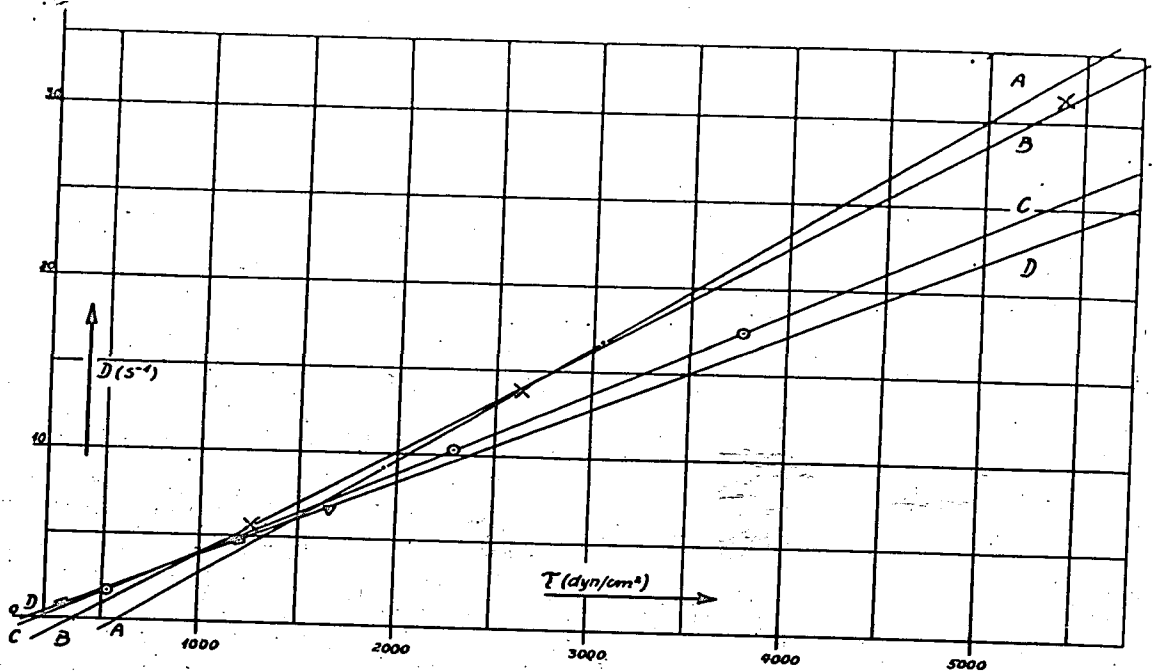


Abb.5: Fließkurven eines Öles in verschiedenen Kapillaren.

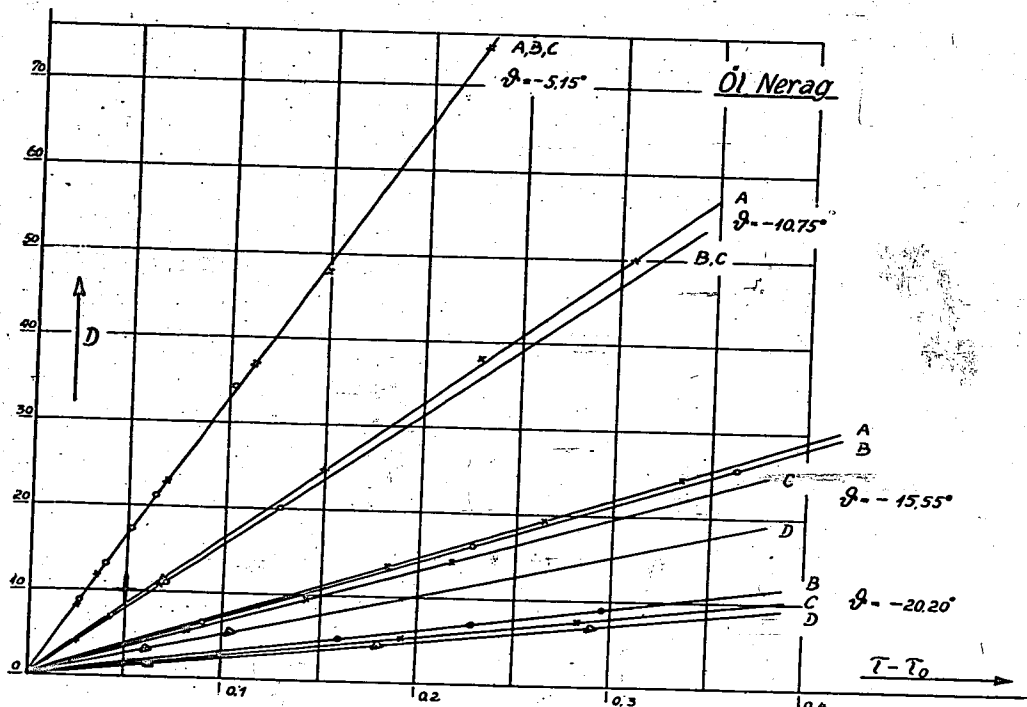


Abb.6: Fließkurvendarstellung eines Öles bei Fortfall der Fließgrenzen (Isothermen).

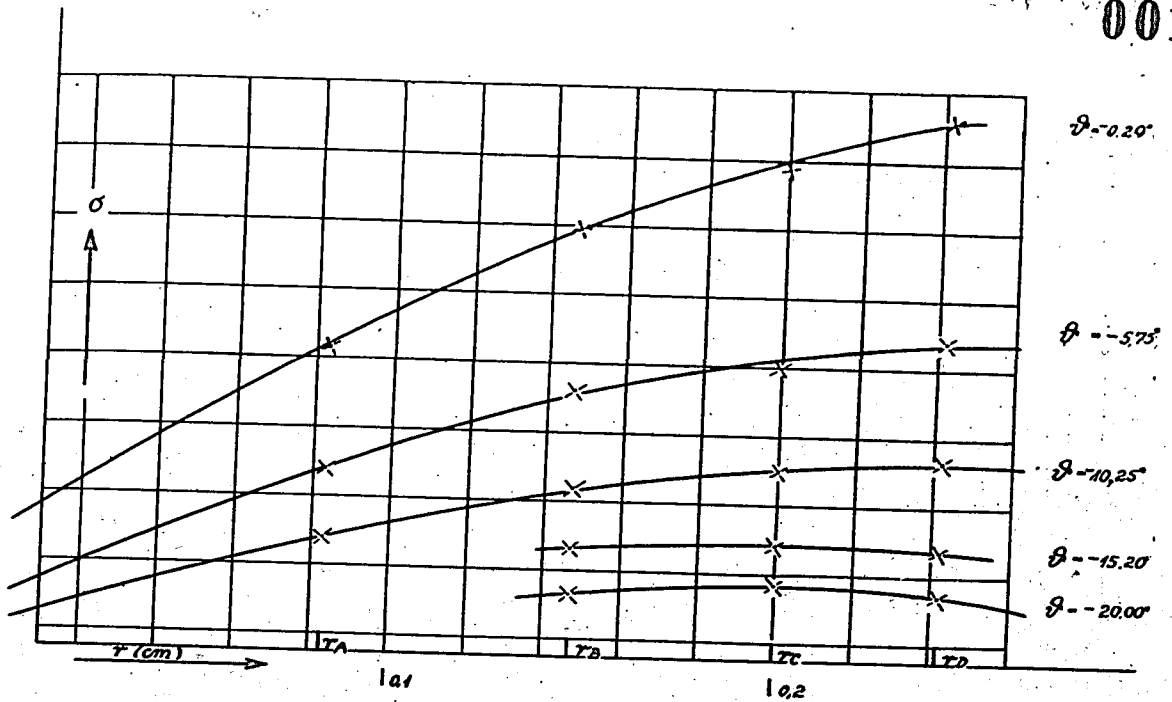


Abb.7: Anwendung der -Methode zur Darstellung des Fließverhaltens.

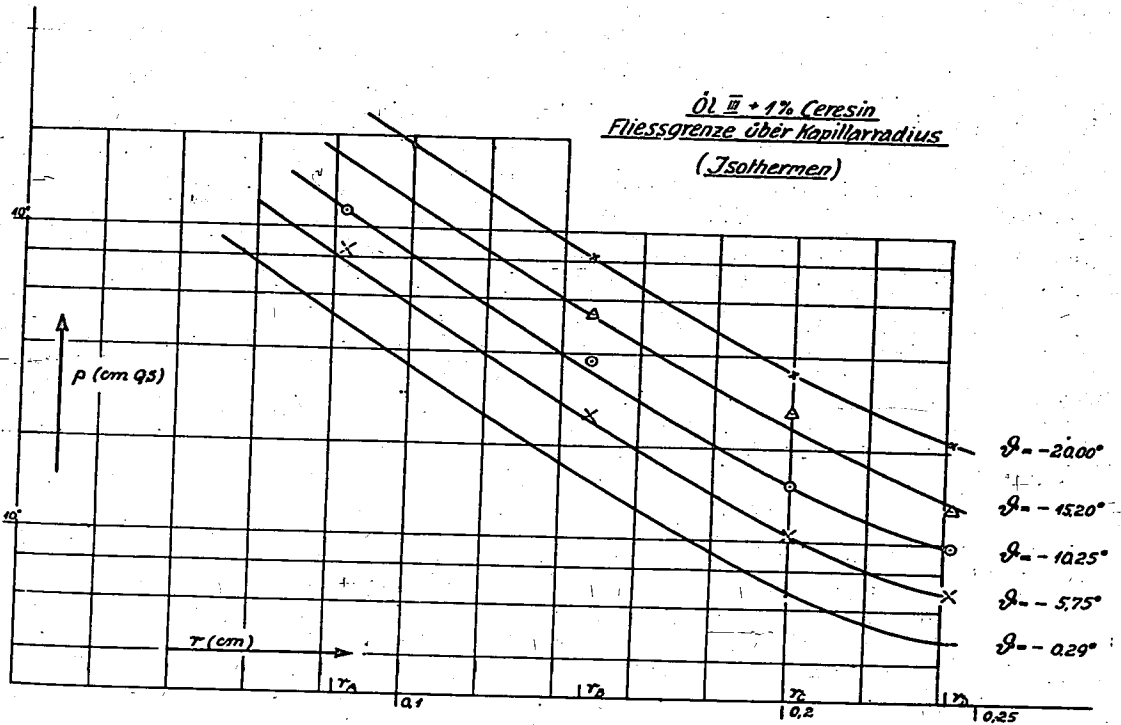


Abb.8: Fließgrenzen in Abhängigkeit vom Kapillarradius.

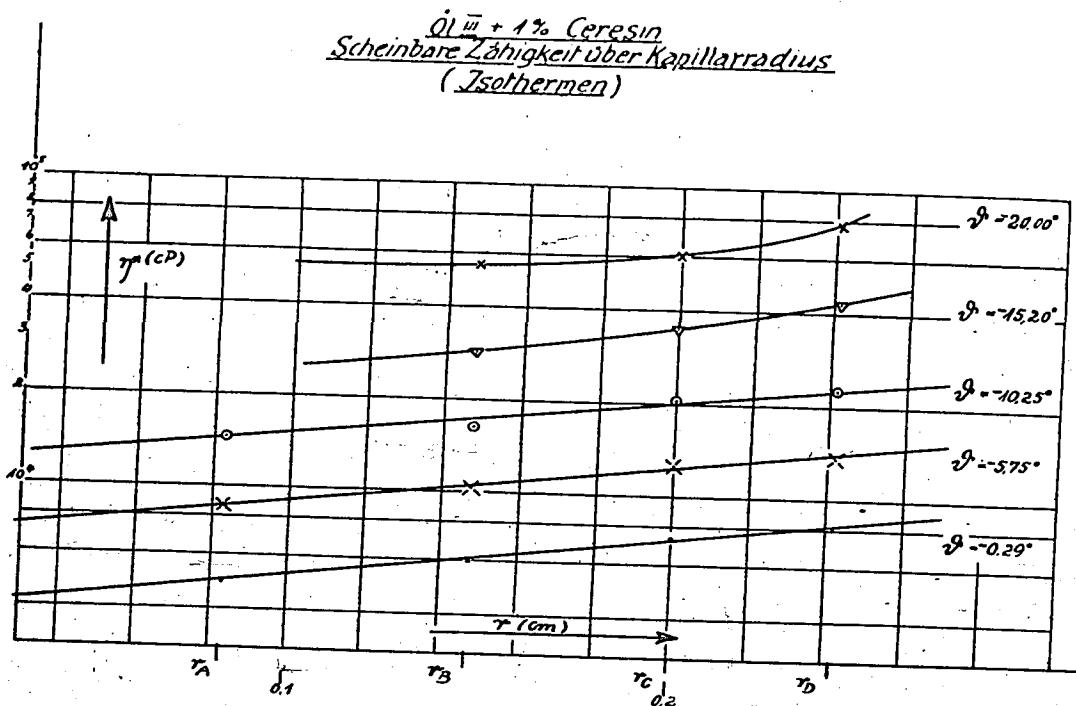


Abb. 9: Die scheinbare Zähigkeit in Abhängigkeit vom Kapillarradius.

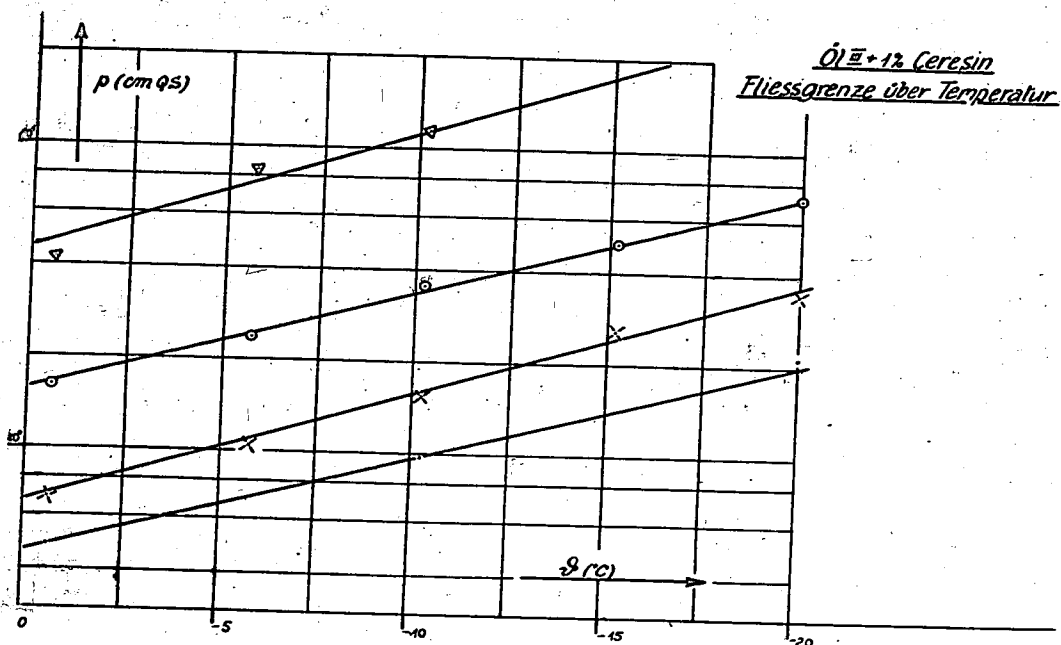


Abb. 10: Fließgrenzen in Abhängigkeit von der Temperatur.