

Viskosimetrie

Kapillarviskosimeter mit Kreis- und Rechteckquerschnitt zur Bestimmung von Fließkurven

Grundlagen, Begriffe, Benennungen

DIN

53 014

Teil 1

Viscometry; capillary viscometers with circular and rectangular cross section for determination of flow curves; principles, concepts, definitions

Viscosimétrie; viscosimètres à tube capillaire de section transversale circulaire ou rectangulaire pour la détermination des courbes d'écoulement; principes, termes, définitions

1 Zweck

In dieser Norm werden Begriffe und Benennungen für Kapillarviskosimeter zur Bestimmung von Fließkurven an Stoffen in flüssigem Zustand bei stationärer Scherströmung festgelegt. Ferner werden Meßverfahren für die Auswertung der Messungen und die Darstellung der Ergebnisse durch Fließkurven beschrieben.

2 Anwendungsbereich

Kapillarviskosimeter zur Bestimmung von Fließkurven werden — den verschiedenen Stoffklassen entsprechend — in sehr unterschiedlichen Viskositätsbereichen eingesetzt. Dies wirkt sich auch auf die Bauart aus. Insgesamt erstreckt sich der interessierende Viskositätsbereich etwa von 10^{-3} bis 10^6 Pa · s.

ANMERKUNG: Die anwendbare Druckdifferenz kann mitunter durch die Druckabhängigkeit der Viskosität begrenzt werden. In manchen Fällen läßt sich der Anwendungsbereich durch Korrektungsverfahren etwas erweitern.

In einem gegebenen Meßsystem läßt sich — bedingt durch die Bauart — das Geschwindigkeitsgefälle im allgemeinen in einem Verhältnis von etwa $1 : 10^3$ (in Sonderfällen bis $1 : 10^4$) variieren.

3 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Bestimmung des Geschwindigkeitsgefälles aus dem Volumenstrom und der Schubspannung aus dem Druckabfall längs der Kapillaren sowie der Fließkurve aus mehreren Wertepaaren von Volumenstrom und Druckabfall bei vorgegebener Geometrie.

Zwei Verfahren sind möglich:

Verfahren A Vorgegeben ist der Volumenstrom; bestimmt wird der zugehörige Wert des Druckabfalls längs der Kapillare.

Verfahren B Vorgegeben ist eine Druckdifferenz zwischen den Enden der Kapillare; bestimmt wird der zugehörige Volumenstrom.

4 Form und Werkstoffe der Kapillaren

4.1 Kapillaren mit Kreisquerschnitt (Kreiskapillaren)

Für Kapillaren mit Kreisquerschnitt $A_c = \pi \cdot R^2$ werden je nach Viskosität der zu untersuchenden Flüssigkeiten Kapillarenradien R zwischen 0,05 und 2 mm verwendet. Die Kapillaren sind in der Regel austauschbar und bestehen vorwiegend aus nichtrostendem Stahl, Hartmetall oder Borosilikatglas 3.3 nach DIN ISO 3585.

ANMERKUNG: Bei engen Kapillaren muß der effektive mittlere Radius indirekt bestimmt werden (siehe DIN 53 014 Teil 2). Bei Radien $R > 0,5$ mm kann der Durchmesser mit geeigneten Innentastern an allen Stellen nachgemessen werden.

Bei genügend weiten Kapillaren sind für die zulässigen Abweichungen des Durchmessers vom Mittelwert δ_m und vom Sollwert δ_s Höchstwerte zu vereinbaren, wenn Messungen mit mehreren Kapillaren in eine Auswertung eingehen, z. B. $\delta_m \leq 2R/100$ und $\delta_s \leq 2R/50$ (siehe DIN 54 811).

4.2 Kapillaren mit Rechteckquerschnitt (Schlitzkapillaren)

Aus vier ebenen Randflächen wird nach Bild 1 ein gerader, gedeckter Strömungskanal mit Rechteckquerschnitt $A_s = B \cdot H$ gebildet. Der Raum zwischen den Randflächen ist der Meßschlitz, der Abstand der parallelen Randflächen in Richtung des Geschwindigkeitsgefälles (y-Richtung) ist die Schlitzhöhe H . Der Schlitz wird durch ebenfalls parallele Seitenwände im Abstand B (Schlitzbreite) in der indifferenten x-Richtung begrenzt.

Die Abweichungen von der Planparallelität der Wände mit dem Abstand H und die Rauhtiefe ihrer Oberflächen muß weniger als $H/200$ betragen. Das den Schlitzkanal enthaltende Viskosimeterteil, die Meßstrecke, wird zweckmäßig zweiteilig ausgebildet und besteht in der Regel aus nichtrostendem Stahl.

Fortsetzung Seite 2 bis 16

Normenausschuß Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.



Documents

Document Sharing Hub

ANMERKUNG: Für die theoretische Beschreibung werden üblicherweise Geschwindigkeitsgefälle nur in y-Richtung, nicht aber in x-Richtung zugelassen. Das bedeutet eine Verletzung der Randbedingung der Wandhaftung an den Seitenflächen in x-Richtung. Der hierdurch entstehende Auswertungsfehler kann durch große Werte des Quotienten B/H (wenigstens 10) klein gehalten werden. Gebräuchlich sind Schlitzhöhen zwischen 0,2 und 1 mm bei Schlitzbreiten von 10 bis 20 mm.

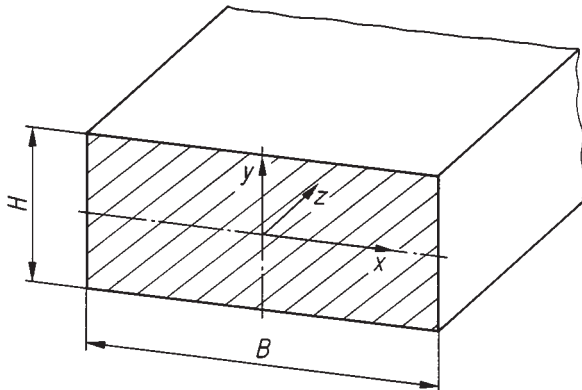


Bild 1: Koordinatensystem der Schlitzzströmung

4.3 Maße der Kapillaren

Die **geometrische Länge** der Kapillare wird mit L' bezeichnet. Ihr zugeordnet ist die **Gesamt-Druckdifferenz** $\Delta p'$ in der Flüssigkeit unmittelbar vor und hinter der Kapillare.

Die **Meßlänge** L der Kapillare ist die Länge der **Meßstrecke**, auf der der Druck um die **Wirk-Druckdifferenz** Δp abfällt. Meßlänge L und Wirk-Druckdifferenz Δp gehen in die Auswertbeziehungen ein. Bei Anwendung von Drucksonden in Anbohrungen der Kapillare senkrecht zu ihrer Achse (häufig bei Schlitzkapillaren) gilt $L < L'$ und $\Delta p < \Delta p'$. Das Verhältnis $L'/(2 \cdot R)$ bzw. L'/H sollte möglichst zwischen 5 und 100 liegen.

ANMERKUNG 1: Meßeinrichtungen, für die $L = L'$ und $\Delta p = \Delta p'$ gilt, erfordern im allgemeinen größere Korrekturen (insbesondere Berücksichtigung des Einlauf-Druckverlusts siehe DIN 53 014 Teil 2).

ANMERKUNG 2: Für das Abschätzen der Reibungserwärmung ist in jedem Fall die Gesamt-Druckdifferenz $\Delta p'$, für die mittlere Verweilzeit der Flüssigkeit in der Kapillarströmung die geometrische Länge L' maßgebend.

5 Bauform für die Meßeinrichtungen

5.1 Viskosimeter mit Kolbenantrieb

Die Vorlage, d.h. das Vorratsgefäß für die Flüssigkeit vor der Meßstrecke, ist ein Zylinder mit einem dicht schließenden Kolben. Der Volumenstrom Q wird durch die Vorhubgeschwindigkeit v_K des Kolbens eingestellt und nach Gleichung (1) bestimmt.

$$Q = \pi \cdot R_K^2 \cdot v_K \quad (1)$$

In Gleichung (1) ist R_K der Zylinderradius. v_K wird entweder durch Abtasten bestimmt (z. B. bei hydraulischem Kolbenantrieb) oder bei einem Spindeltrieb aus der geregelten Drehzahl des Antriebsmotors berechnet.

ANMERKUNG 1: Bei Viskosimetern mit Kolbenantrieb wird häufig der Volumenstrom Q vorgegeben (Meßverfahren A), doch läßt sich mitunter nach Meßverfahren B die Druckdifferenz vorgeben

(durch Regeleinrichtungen oder durch Erzeugen der Kraft am Kolben durch Gewichtsstücke, siehe Abschnitt 6). Der Kolbenantrieb eignet sich auch für eine stetige Veränderung des Volumenstroms.

ANMERKUNG 2: In besonderen Fällen (etwa aus Gründen der Materialverträglichkeit) kann der Kolben auf eine Hilfsflüssigkeit wirken, die durch eine entspannt bleibende Membran von der Flüssigkeit getrennt ist, deren Fließkurve bestimmt wird (indirekter Kolbenantrieb).

5.2 Viskosimeter mit Doppelkolbenantrieb

Das Viskosimeter besitzt an beiden Kapillarenenden eine Vorlage mit Kolben. Die Kolben arbeiten gegenseitig synchron.

ANMERKUNG: Zweck dieser Einrichtung ist es, wiederholt Messungen an einer Vorlagenfüllung durchzuführen sowie durch Einstellen eines Gegendruckes Fließkurven unter verschiedenen isotropen Drücken aufzunehmen.

5.3 Viskosimeter mit direktem Gasdruck-Antrieb

In Viskosimetern mit direktem Gasdruck-Antrieb kommt für die Erzeugung der Druckdifferenz nur ein Überdruck vor dem Kapillareneingang in Betracht, während hinter dem Kapillarenausgang der Umgebungsdruck herrscht. Das Viskosimeter benötigt vor oder hinter der Kapillare einen Verschluß, der in voll geöffnetem Zustand keinen wesentlichen Druckverlust bedingt.

Die Flüssigkeit, deren Fließkurve bestimmt werden soll, füllt die Vorlage nicht vollständig. Über ihrer freien Oberfläche wird ein Überdruck durch ein inertes Gas aus einem Druckbehälter über eine geeignete Regelvorrichtung erzeugt. Die Vorlage muß mit den für das Arbeiten mit hohen Gasüberdrücken üblichen Sicherheitsvorrichtungen versehen sein.

Nach dem Aufbringen des Gasüberdrucks oder seiner Änderung muß gewartet werden, bis die durch adiabate Kompression oder Entspannung verursachte Temperaturänderung durch die Temperiereinrichtung (siehe Abschnitt 8) beseitigt ist. Dabei ist auch der Gasdruck etwas nachzuregeln.

Um insbesondere bei hochviskosen Flüssigkeiten eine gleichmäßige Entleerung der Vorlage zu erreichen, können aufschwimmende Verdrängungskörper (Scheiben oder Kugeln) benutzt werden.

5.4 Viskosimeter mit indirektem Gasdruck-Antrieb

Der Teil der Flüssigkeit, der zur Messung verwendet wird, wird durch eine flexible, entspannt bleibende Membran von dem Teil der Flüssigkeit getrennt, der mit dem Gas in Berührung kommt. Auch für diese Viskosimeter gelten die Festlegungen nach Abschnitt 5.3.

ANMERKUNG 1: Ein aufschwimmender Verdrängungskörper kann mitunter das Lösen des Druckgases in der Probe hinreichend verzögern.

ANMERKUNG 2: Viskosimeter mit Gasdruck-Antrieb sind für das Meßverfahren B ausgelegt.

5.5 Viskosimeter mit Fördereinrichtungen

Bei diesen Meßeinrichtungen wird keine vorgegebene Portion vor der Messung in die Vorlage gefüllt, sondern eine Fördervorrichtung saugt ständig Flüssigkeit an und drückt sie (nach einer Einlaufstrecke) durch die Kapillare. Die Meßeinrichtungen können für das Verfahren A oder B oder auch wahlweise für beide ausgelegt sein.

5.5.1 Pumpenantrieb

Der Volumenstrom Q wird durch kalibrierte Zahnrad- oder Drehkolbenpumpen (auch Membran- oder Kolbenpumpen mit Puffervolumen) erzeugt.

ANMERKUNG: Im Prinzip ist der Volumenstrom vorgegeben, so daß es sich um das Verfahren A handeln sollte. Wegen des möglichen Dauerbetriebs läßt sich aber auch eine gewünschte Wirk-Druckdifferenz Δp einstellen und die dazu notwendige Förderleistung der Pumpe als abhängige Variable ansehen.

5.5.2 Schneckenantrieb

Der Überdruck wird durch einen Schneckenextruder erzeugt.

5.5.3 Nicht-isotherme Förderung

Befindet sich die Flüssigkeit innerhalb der Fördervorrichtung auf einer Temperatur ϑ_f , die von der Meß- bzw. Vorlagentemperatur ϑ_m verschieden ist, so ist Gleichung (2) anzuwenden

$$Q_m = 1 + \alpha_v \cdot (\vartheta_m - \vartheta_f) \cdot Q_f \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

Q_m Volumenstrom in der Meßstrecke

Q_f Volumenstrom in der Fördervorrichtung

ϑ_m Meßtemperatur

ϑ_f Temperatur der Flüssigkeit in der Fördervorrichtung

α_v Volumenausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit

ANMERKUNG: Die Meßeinrichtungen nach Abschnitt 5.5 werden auch für Betriebsmessungen bei großen Probemengen verwendet, z.B. im Nebenschluß zur laufenden Produktkontrolle. Ausnahmen davon finden sich bei den Pumpenantrieben nach Abschnitt 5.5.1, wenn klein dimensionierte Pumpen die Flüssigkeit im Kreislauf fördern.

5.6 Einstellzeit

Die Einstellzeit ist die Zeitspanne vom Einschalten des Meßvorgangs bis zur Annäherung der Meßanzeige auf etwa 3% an den stationären Endzustand.

ANMERKUNG 1: Diese Einstellzeit ist für die Meßeinrichtung typisch. Durch besondere Stoffeigenschaften der zu prüfenden Flüssigkeit können längere Zeiten und/oder größere Schwankungen auftreten.

Für Meßeinrichtungen nach den Abschnitten 5.1 oder 5.2 wird die Einstellzeit in der Regel durch die Ausbildung der Druckdifferenz oder die Trägheit der Druckanzeige bestimmt. Für Meßeinrichtungen der Bauform nach den Abschnitten 5.3 oder 5.4 ist meistens die Zeit für das volle Öffnen der Einrichtung zum Kapillarenabschluß wesentlich. Komplizierter sind die Verhältnisse bei Viskosimetern mit Pumpen- und Schneckenantrieb nach Abschnitt 5.5.

ANMERKUNG 2: Bei Meßeinrichtungen mit fest vorgegebener Probemenge in der Vorlage ist die Einstellzeit mitentscheidend dafür, wieviel Meßpunkte der Fließkurve mit einer Vorlagenfüllung aufgenommen werden können. Für Anordnungen nach Abschnitt 5.5 ist die Einstellzeit in dieser Hinsicht nicht kritisch. Beim Registrieren von Fließkurven richtet sich die maximal zulässige Änderungsgeschwindigkeit der Druckdifferenz Δp bzw. des Volumenstroms Q nach der Einstellzeit.

6 Messung der Wirk-Druckdifferenz

6.1 Meßgeräte

Es werden Druckmeßgeräte mit Rohrfeder (Druckmeßgeräte Klasse 0,1, endwertbelastbar, nach DIN 16 005) oder gleichwertige Druckaufnehmer z. B. auf induktiver, kapazitiver oder resistiver Grundlage eingesetzt. Diese Druckmeßgeräte sollten kalibriert sein.

ANMERKUNG: Welche der verfügbaren Druckmeßgeräte anwendbar sind, wird auch durch die rheologischen und chemischen Eigenschaften der zu prüfenden Flüssigkeit bestimmt.

6.2 Bestimmung der Wirk-Druckdifferenz innerhalb der Kapillare

Es sind immer mindestens 2 gleichartige Meßstellen erforderlich. Die Meßstellen sind so weit von den Enden der Kapillare entfernt, daß die materiell stationäre Schichtenströmung (en: viscometric flow) voll ausgebildet ist. Die Wirk-Druckdifferenz Δp kann nach zwei Verfahren bestimmt werden.

a) Durch Anbohren der Meßstrecke und Anschließen eines Druckmeßkanals (en: pressure hole); in diesem Fall ist der Bohrungsdurchmesser so klein zu wählen, daß die Meßstelle als angenähert punktförmig gelten kann (siehe DIN 53 014 Teil 2). Der Druck wird im Druckmeßkanal zum Meßgerät weitergeleitet, gegebenenfalls unter Zwischenschalten einer Überträgerflüssigkeit, die mit der zu prüfenden Flüssigkeit verträglich, aber nicht mischbar ist.

b) Mit Hilfe von elektronischen Membrandruckaufnehmern, deren Membranfläche mit der Schlitzfläche abschließt.

ANMERKUNG: Die Druckmeßverfahren nach Aufzählung a) sind gebräuchlicher und leichter zu realisieren. Im allgemeinen ist die Einstellzeit für die Druckmeßeinrichtung nach Aufzählung a) größer als für die nach Aufzählung b).

6.3 Bestimmung der Gesamt-Druckdifferenz

Die Überdruckmessung in der Vorlage erfordert nur eine Meßstelle. Schwankungen des Umgebungsdruckes, soweit sie im Druckmeßgerät nicht miterfaßt werden, sind zu vernachlässigen.

Maßgebend ist der Überdruck unmittelbar vor dem Kapillareingang. Er bedarf in der Regel noch einer Korrektur (nach DIN 53 014 Teil 2).

Der Anschluß der Druckmeßgeräte ist im allgemeinen einfacher als bei den Meßeinrichtungen nach Abschnitt 6.2. Ein besonderer Druckmeßkanal ist erforderlich, wenn der Druck in der Flüssigkeit in der Vorlage bestimmt werden muß und der Druckaufnehmer die Meßtemperatur nicht vertragen würde.

Bei Viskosimetern nach den Abschnitten 5.1 oder 5.2 kann der Wirk-Differenzdruck Δp auch aus der Kolbenkraft F_K nach Gleichung (3) berechnet werden (siehe auch DIN 53 014 Teil 2).

$$\Delta p = F_K / \pi \cdot R_K^2 \quad (3)$$

F_K wird hierbei z. B. mit Kraftmeßdosens gemessen oder durch Auflegen von Gewichtsstücken bekannter Masse eingestellt. Berechnung der Abweichungen und Korrekturen nach DIN 53 014 Teil 2.

7 Bestimmung des Volumenstroms

7.1 Diskontinuierliche Bestimmung

7.1.1 Direkte Bestimmung des Flüssigkeitsvolumens am Kapillarenausgang

Das während der Zeitspanne Δt ausgetretene Flüssigkeitsvolumen ΔV wird in einer der Meßstrecke nachgeschalteten Bürettenanordnung gemessen. Der Bürettendurchmesser muß wenigstens das Fünffache des Kapillarendurchmessers betragen. Ist der Bürettendurchmesser nicht größer als 5 mm, so kann die Bürette horizontal (oder nahezu horizontal) angeordnet werden.

ANMERKUNG: Diese besonders einfache und übersichtliche Meßeinrichtung setzt voraus, daß Meß- und Bürettentemperatur nur wenig voneinander verschieden sind. Insbesondere darf die Bürettentemperatur nicht wesentlich tiefer sein. Anstelle der Laufzeitbestimmung des Meniskus in einer Bürette werden mitunter Laufzeitbestimmungen an einem mitgeführten Schwebekörper oder an einem der Flüssigkeit aufgeprägten thermischen Signal verwendet.

7.1.2 Indirekte Bestimmung des Flüssigkeitsvolumens durch Wägen

Nach dem Erreichen des stationären Zustandes wird während einer bestimmten Zeitspanne die aus der Kapillare austretende Flüssigkeit aufgefangen und ihre Masse Δm durch Wägen bestimmt. Mit der Dichte ρ_m der Flüssigkeit bei der Meßtemperatur wird hieraus das während der Zeitspanne Δt ausgetretene Flüssigkeitsvolumen ΔV erhalten. Der Volumenstrom ist durch Gleichung (4) gegeben

$$Q = \frac{\Delta m}{\rho_m \cdot \Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

7.1.3 Volumenbestimmung aus dem Kolbenweg

Das Produkt aus Vorlagenquerschnitt und dem während einer definierten Zeitspanne zurückgelegten Kolbenweg bei Viskosimetern nach Abschnitt 5.1 ist das Volumen am Kapillareneingang — zum Unterschied von den Viskosimetern mit Meßeinrichtungen nach den Abschnitten 7.1.1 und 7.1.2, bei denen das Volumen am Kapillarenausgang bestimmt wird. Berücksichtigung der Kompressibilität und der Leckverluste nach DIN 53 014 Teil 2.

Bei Viskosimetern mit Doppelkolbenantrieb nach Abschnitt 5.2 ist nur dieses Verfahren der Volumenbestimmung möglich, jedoch wahlweise am Kapillaren-Eingang oder -Ausgang. Damit können Kompressibilität und Leckverluste erfaßt werden.

7.1.4 Bestimmung der Durchflußzeit

— Stoppuhr mit Skalenteilungswert 0,1 s, die in angemessenen Zeitabständen mit einer Normaluhr verglichen wird (Abweichung kleiner als 15 s in 24 h). Die Stoppuhr sollte kalibriert sein.

oder

— Elektronischer Zeitmesser, der auf 10^{-4} konstant ist und dem Nennwert entspricht.

7.2 Kontinuierliche Bestimmung

7.2.1 Registrierende Wägung

Bei Verwendung elektronischer Zeitmesser und elektronischer Waagen wird die zeitliche Zunahme der Masse der ausgetretenen Flüssigkeitsmasse gemessen und registriert.

7.2.2 Weg-Zeit-Registrierung bei Kolbenantrieb

Bei Viskosimetern mit Kolbenantrieb wird der Kolbenweg als Funktion der Zeit registriert. Die Gleichförmigkeit des Fließens kann damit geprüft werden.

ANMERKUNG: Mit Hilfe dieser Registrierung werden auch Veränderungen an der Probe leicht festgestellt.

7.2.3 Strömungsmessung

Es dürfen alle Strömungsmesser verwendet werden, die gleich gut zur Bestimmung des Volumenstroms Q geeignet sind wie die Meßeinrichtungen für die Verfahren nach Abschnitt 7.1 und die Bestimmung der Wirk-Druckdifferenz Δp nicht beeinträchtigen.

ANMERKUNG: Hierzu gehören z.B. die Förderpumpen nach Abschnitt 5.5.1 sowie auch Einrichtungen, in denen die Geschwindigkeit direkt gemessen wird oder die den Volumenstrom in eine Drehzahl wandeln (Turbinen- oder Flügelradzähler).

8 Temperierung und Temperaturmessung

Vorlage und Meßstrecke müssen sorgfältig temperiert werden. Je nach Bauform und Anwendungsbereich geschieht dies

- durch Einstellen in ein Temperierbad,
- Ausrüsten mit Temperierschlangen oder Temperiermänteln in Verbindung mit einem Umwälzthermostaten oder
- geregelte elektrische Heizwicklungen.

Wenigstens eine Temperaturmeßstelle muß sich in der Flüssigkeit, in der Vorlage oder an der Innenwand der Vorlage befinden. Die Anzeige dieses Thermometers gilt als Meßtemperatur ϑ_m . Als Thermometer sind verwendbar:

- Platin-Widerstandsthermometer (nach DIN IEC 751 und [1])
- Quecksilberthermometer (insbesondere Stabthermometer nach DIN 12 799) mit Skalenteilungswert 0,1 °C.
- Thermopaare nach DIN IEC 584 Teil 1, insbesondere Eisen/Kupfer-Nickel (Typ J), Nickel-Chrom/Nickel (Typ K), Kupfer/Kupfer-Nickel (Typ T). Zweckmäßig sind Mantelthermopaare (Anordnung und Behandlung von Thermopaaren siehe VDE/VDI-Richtlinie 3511).

Die Anzeige der Thermometer wird im eingebauten, betriebsähnlichen Zustand mit der Anzeige geeichter Thermometer verglichen. Diese Prüfung ist in angemessenen Zeitabständen zu wiederholen.

9 Verfahren zur Auswertung der Meßergebnisse

9.1 Voraussetzungen

Für die Beziehungen zur Auswertung ist die Gültigkeit der nachfolgend aufgeführten Annahmen vorausgesetzt. Abweichungen hiervon müssen — soweit möglich — durch Korrekturen berücksichtigt werden, die in DIN 53 014 Teil 2 behandelt sind.

- Die Flüssigkeit soll homogen sein. Mehrphasige Stoffsysteme müssen so feindispers sein, daß sie als quasi-homogen angesehen werden können (siehe Erläuterungen). Die disperse Phase soll an der Wand weder wesentlich verarmen noch angereichert werden.

- Die Flüssigkeit wird als inkompressibel betrachtet.
- Die Druckabhängigkeit der Viskosität soll im Bereich der Gesamt-Druckdifferenz zu vernachlässigen sein.
- Der Fließvorgang wird allein durch die laminare, viskosimetrische — d.h. materiell stationäre (voll entwickelte) — Schichtenströmung (siehe DIN 1342 Teil 1) bestimmt.
- Der Fließvorgang wird als isotherm behandelt.
- Die Flüssigkeit soll nicht an den Randflächen gleiten (Wandhaftung).

ANMERKUNG: Die im Abschnitt 4.3 eingeführte Meßlänge L der Kapillare und die Wirk-Druckdifferenz Δp werden in den Beziehungen der folgenden Abschnitte unkorrigiert verwendet. Insbesondere hierzu ist DIN 53 014 Teil 2 zu beachten.

9.2 Form der Grundströmung

Die schleichend laminare Strömung wird Grundströmung genannt. Der Bereich ihrer Stabilität wird durch die Reynolds-Zahl Re gekennzeichnet, die unterhalb eines kritischen Wertes bleiben muß. Das Strömungsfeld oder Fließfeld ist die Gesamtheit der Bewegungszustände der Flüssigkeit in der Kapillare. In der Grundströmung sind Trägheitseinflüsse unwirksam oder zu vernachlässigen. Die Grundströmung in Kapillaren ist eine Schichtenströmung (siehe DIN 13 342).

In dieser Norm wird bei der Behandlung der Strömungsformen (unter den Voraussetzungen nach Abschnitt 9.1) von der Existenz der Schichtenströmung ausgegangen und nur die Verteilung der Geschwindigkeiten und Schubspannung normal zu den Scherflächen der quasi-starren Schichten für newtonsche und nicht-newtonsche Flüssigkeiten angegeben.

Bei der Grundströmung in einer geraden Kapillare (Poiseuille Strömung) sind im Falle einer Kapillare mit Kreisquerschnitt die quasi-starren Schichten konzentrische Zylindermäntel, die sich teleskopartig gegeneinander bewegen. Bei der ebenen Schlitzströmung sind die quasi-starren Schichten parallele Ebenen, die sich in der z -Richtung (siehe Bild 1) gegeneinander bewegen.

In der Achse der Kapillaren mit Kreisquerschnitt und in der Mittelebene mit dem Abstand $H/2$ von den Wänden der Schlitzkapillare besitzt die Geschwindigkeit v_z der Flüssigkeit ihren größten Wert; Geschwindigkeitsgefälle D und Schubspannung τ sind Null. Die Schubspannung

nimmt mit der Entfernung r von der Achse bzw. mit der Entfernung y von der Mittelebene linear bis zu dem Maximalwert τ_w an der Wand zu. Diese Verteilung ist unabhängig vom Fließgesetz. Das Geschwindigkeitsgefälle nimmt ebenfalls mit wachsendem Abstand r bzw. y monoton bis zum Maximalwert D_w an der Wand zu, dieser Anstieg hängt aber von den Fließeigenschaften ab und ist nur bei newtonschem Verhalten linear.

ANMERKUNG: Grundsätzlich müßten bei der Beschreibung von Schichtenströmungen konvek-tive Koordinaten verwendet werden. Bei den Grundströmungen in geraden Kapillaren ergibt sich jedoch kein Unterschied gegenüber einem relativ zur Kapillarenwand ruhenden Koordinatensystem, so daß diese vereinfachende Betrachtungsweise zulässig ist.

9.3 Wahres und scheinbares Geschwindigkeitsgefälle

In der Kapillarströmung ist die Verteilung der Schubspannung über den Querschnitt unabhängig von den Fließeigenschaften, die Verteilung des Geschwindigkeitsgefälles hängt dagegen von den Fließeigenschaften ab, die zunächst unbekannt sind. Werden Geschwindigkeitsgefälle und/oder Viskositäten aus den Meßwerten der Wirk-Druck-Differenz Δp und dem Volumenstrom Q an nicht-newtonschen Flüssigkeiten mit Hilfe von Beziehungen berechnet, die nur für newtonsche Flüssigkeiten gelten, so werden sie als **scheinbare** Geschwindigkeitsgefälle bzw. Viskositäten bezeichnet.

Da die Viskosität nicht-newtonscher Flüssigkeiten von der Schubspannung abhängt, muß festgelegt werden, für welche Stelle des Querschnitts die scheinbare Viskosität angegeben werden soll. Hierfür kommt häufig der Maximalwert an der Kapillarenwand in Betracht (siehe dagegen Abschnitt 10.4). Bei newtonschen Flüssigkeiten gilt Gleichung (5) für Schubspannung und wahres Geschwindigkeitsgefälle an der Wand,

$$\tau_w = \eta \cdot D_w \quad (5)$$

bei nicht-newtonschen Flüssigkeiten Gleichung (6).

$$\tau_w = \eta_{ap} \cdot D_{ap} \quad (6)$$

η_{ap} und D_{ap} sind die scheinbare Viskosität und das scheinbare Geschwindigkeitsgefälle an der Wand, die der (in jedem Fall wahren) Schubspannung an der Wand zugeordnet sind.

9.4 Allgemein geltende Beziehungen

Tabelle 1

Größe	Kapillaren mit	
	Kreisquerschnitt (Radius R)	Schlitzquerschnitt (Breite $B \gg$ Höhe H)
Schubspannung τ_w an der Wand	$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta p}{2 \cdot L} \quad (7)$	$\tau_w = \frac{H \cdot \Delta p}{2 \cdot L} \quad (8)$
Schubspannung τ in der Flüssigkeit	$\tau(r) = \frac{r \cdot \Delta p}{2 \cdot L} \quad (9)$	$\tau(y) = \frac{y \cdot \Delta p}{L} \quad (10)$
Volumenstrom Q	$Q = \pi \int_0^R r^2 \cdot D(r) \cdot dr \quad (11)$	$Q = 2 \cdot B \int_0^{H/2} y \cdot D(y) \cdot dy \quad (12)$