

Nicht-newtonsche Flüssigkeiten Begriffe, Stoffgesetze

DIN
13 342

Non-Newtonian liquids; concepts, rheological equations

Inhalt

	Seite		Seite
1 Begriffe	1	3.1.1 Allgemeine algebraische Darstellung	3
1.1 Flüssigkeit	1	3.1.2 Graphische Darstellung, Fließkurve, Viskositätskurve	4
1.2 Einteilung der Flüssigkeiten	1	3.1.3 Fließkurventypen und spezielle Fließgesetze	5
1.2.1 Newtonsche Flüssigkeit	1	3.2 Fließgesetze für linear-viskoelastisches Verhalten; lineare rheologische Modelle	6
1.2.2 Nicht-newtonsche Flüssigkeit	1	3.2.1 Flüssigkeit mit unverzogter Elastizität	6
1.2.2.1 Nichtlinear-reinviskose Flüssigkeit	2	3.2.2 Flüssigkeit mit verzogter Elastizität	6
1.2.2.2 Linear-viskoelastische Flüssigkeit	2	3.2.3 Flüssigkeit mit unverzogter und mit verzogter Elastizität	6
1.2.2.3 Nichtlinear-viskoelastische Flüssigkeit	2	3.3 Fließgesetze für nichtlinear-viskoelastische Schichtenströmung	6
1.2.3 Flüssigkeit mit zeitabhängigen rheologischen Eigenschaften	2	3.4 Dehnströmung	7
1.3 Plastischer Stoff	2	3.4.1 Skalare Fließgesetze bei einachsigem Zug	7
2 Stoffgesetze	3	3.4.2 Trouton-Verhältnis	7
2.1 Rheologische Stoffgesetze	3		
2.2 Allgemeine Form des Fließgesetzes	3		
2.3 Skalares Fließgesetz	3		
3 Anwendung des skalaren Fließgesetzes	3		
3.1 Fließgesetze für reinviskose Schichtenströmung	3		

1 Begriffe

1.1 Flüssigkeit

Ein deformierbarer Stoff heißt Flüssigkeit*), wenn er die folgenden Eigenschaften aufweist:

- Jede endliche, noch so kleine Schubspannung, die nicht durch Trägheits- oder Grenzflächenkräfte kompensiert wird, erzeugt bei zeitlich unbegrenzter Einwirkung eine unbegrenzt große Verformung, ohne daß Bruchmechanismen hierfür wesentlich sind. Gleichbedeutend hiermit ist: Nach dem Aufhören der Einwirkung einer endlichen Schubspannung verschwindet die durch sie hervorgerufene Verformung auch nach unbegrenzt langer Zeit nicht wieder vollständig.
- Bei zeitlich konstanter, endlicher Schubspannung strebt die Verformungsgeschwindigkeit des Vorganges nach a) gegen einen zeitlich konstanten, endlichen Endwert.
- Der funktionale Zusammenhang zwischen zeitlich konstanter Schubspannung und zugehörigem Endwert der Verformungsgeschwindigkeit nach b) ist bis zu den kleinsten messend zu verfolgenden Schubspannungen herab stetig und endlich.

*) Alle folgenden Betrachtungen gelten grundsätzlich für alle Fluide, also auch für Gase.

Anmerkung 1: Die Beobachtbarkeit dieser Eigenschaften kann zwar durch Bruchvorgänge, durch Abweichen vom isothermen Verlauf des Fließens und durch Stoffumwandlungen oder Diffusion beeinträchtigt werden, doch steht das Auftreten solcher Vorgänge der Charakterisierung des Stoffes als einer Flüssigkeit nicht entgegen.

Erhält ein Stoff durch besondere mechanische Einwirkungen (z. B. Vibrieren, Beschallung) fluide Eigenschaften, so kann er als Flüssigkeit angesehen werden. Die mechanischen Einwirkungen erhalten dann die Bedeutung von äußeren Zustandsparametern (wie hydrostatischer Druck oder Temperatur).

Anmerkung 2: In der vorliegenden Norm werden auch Stoffsysteme kurz als Stoff bezeichnet.

1.2 Einteilung der Flüssigkeiten

1.2.1 Newtonsche Flüssigkeit

Verhält sich eine Flüssigkeit linear-reinviskos im Sinne der in DIN 1342 aufgeführten Merkmale, so heißt sie newtonsche Flüssigkeit.

1.2.2 Nicht-newtonsche Flüssigkeit

Unter dem Oberbegriff nicht-newtonsche Flüssigkeit werden drei Klassen von Flüssigkeiten zusammengefaßt: die nichtlinear-reinviskosen, die linear-viskoelastischen und die nichtlinear-viskoelastischen Flüssigkeiten. Diese bilden zusammen mit den newtonschen Flüssigkeiten die gesamte Klasse der Flüssigkeiten.

Fortsetzung Seite 2 bis 7

Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen (AEF) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

Anmerkung: Vom strukturreheologischen Standpunkt betrachtet liegt dieser nach phänomenologischen Gesichtspunkten getroffenen Klasseneinteilung keine qualitative Unterscheidung von Strukturen zugrunde. Die Einteilung erfolgt vielmehr nach dem Wert von stoffspezifischen Zeitkonstanten (z.B. Platzwechsel- oder Relaxationszeiten) multipliziert mit der praktisch realisierten Deformationsgeschwindigkeit. Ist ein solches Produkt verschwindend klein, so liegt newtonsches Verhalten vor; ist es größer, aber noch klein gegen eins, wird in der Regel nichtlinear-reinviskoses Fließen zu beobachten sein; ist es schließlich von der Größenordnung eins, treten im allgemeinen auch viskoelastische Eigenschaften in Erscheinung. Bei der Unterscheidung reinviskos-viskoelastisch spielen ebenso die Änderungsgeschwindigkeiten der Vorgänge und ihre beobachtungsmäßige zeitliche Auflösbarkeit eine Rolle.

1.2.2.1 Nichtlinear-reinviskose Flüssigkeit

Eine Flüssigkeit verhält sich nichtlinear-reinviskos, wenn sie der folgenden Bedingung a) und mindestens einer der folgenden Bedingungen b) oder c) genügt:

- Elastische Verformungen bei zeitlich veränderlicher Schubspannung müssen so klein sein, daß sie für die Beschreibung des Fließvorganges unwesentlich sind.
- Schubspannung und Deformationsgeschwindigkeit sind nicht proportional, sondern hängen nach einer nichtlinearen Beziehung zusammen.
- Reine Scherverformungen führen nicht nur zu den entsprechenden Schubspannungen, sondern auch zu Normalspannungen.

Anmerkung 1: Die nichtlinear-reinviskosen Flüssigkeiten sind zuerst als nicht-newtonsche Flüssigkeiten erkannt worden, insbesondere an der Erscheinung nach b).

Anmerkung 2: Zur leichteren Veranschaulichung ist es zweckmäßig, sich volumenbeständige Fließvorgänge vorzustellen, in denen die Beschleunigungskräfte klein gegen die Reibungskräfte sind.

1.2.2.2 Linear-viskoelastische Flüssigkeit

Viskoelastisch verhält sich eine Flüssigkeit, wenn die durch das Ausüben einer Schubspannung verrichtete Verformungsarbeit nicht sofort vollständig dissipiert (irreversibel in Reibungswärme verwandelt) wird. Linear verhält sich eine viskoelastische Flüssigkeit, wenn sie den folgenden Bedingungen genügt:

- Alle irreversiblen Anteile des Fließvorganges verlaufen nach dem newtonschen Ansatz (siehe DIN 1342), und zwar in gleicher Weise für alle einander zugeordneten Komponenten der Spannung und der Deformationsgeschwindigkeit.
- Alle reversiblen Anteile der Scherverformung verlaufen nach dem Hookeschen Gesetz (eine Norm hierüber ist vorgesehen), und zwar in gleicher Weise für alle einander zugeordneten Komponenten der Spannung und der Deformation.

Anmerkung 1: Aus den Bedingungen a) und b) folgt, daß zwischen einander nicht zugeordneten Komponenten der Spannung, Deformation oder Deformationsgeschwindigkeit keine Wechselwirkungen auftreten, d. h. es gilt das Superpositionsprinzip.

Anmerkung 2: Flüssigkeiten verhalten sich im Hinblick auf allseitigen Druck wie viskoelastische Festkörper, wobei im einfachsten Falle linear-viskoelastischen Verhaltens der Kompressibilitätskoeffizient die elastischen, der Koeffizient der Volumenviskosität die viskosen Eigenschaften kennzeichnet. Flüssigkeitsverhalten nach DIN 1342 setzt deshalb wesentlich volumenbeständiges Fließen voraus.

1.2.2.3 Nichtlinear-viskoelastische Flüssigkeit

Nichtlinear verhält sich eine viskoelastische Flüssigkeit, wenn für wenigstens eine Komponente des Fließvorganges mindestens eine der Bedingungen a) oder b) des Abschnittes 1.2.2.2 nicht mehr erfüllt ist. Die Abweichungen vom linearen Verhalten sind bei großen Deformationsgeschwindigkeiten in der Regel stärker als bei kleinen.

1.2.3 Flüssigkeit mit zeitabhängigen rheologischen Eigenschaften

Obgleich die Klassifizierung der Flüssigkeiten nach den Abschnitten 1.2.2.1 bis 1.2.2.3 dieser Norm und nach DIN 1342 erschöpfend ist, können die rheologischen Eigenschaften durch die Verformungsvorgänge während deren Ablaufs in einer Weise verändert werden, daß die Einordnung einer Flüssigkeit in eine der Klassen nach Abschnitt 1.2.1 und Abschnitt 1.2.2 erschwert ist.

Anmerkung 1: Änderungen rheologischer Eigenschaften mit der Zeit, die unabhängig von dem Verformungsvorgang verlaufen (z.B. Stoffumwandlung durch eine von selbst ablaufende chemische Reaktion), können meßtechnische Besonderheiten bedingen, haben aber für die Festlegung von Begriffen keine Bedeutung.

Zu beobachten sind sowohl wieder zurückgehende als auch bleibende Änderungen der Fließeigenschaften:

- Thixotropie (Eigenschaftswort: thixotrop) heißt eine Abnahme der Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung und Wiederzunahme nach Aufhören der Beanspruchung.
- Rheopexie (Eigenschaftswort: rheopex) heißt eine Zunahme der Viskosität infolge andauernder mechanischer Beanspruchung und Wiederabnahme nach Aufhören der Beanspruchung.

In beiden Fällen strebt die Viskosität gegen einen zeitlich konstanten Endwert. Die strenge Anwendung dieser Begriffe ist auf wieder zurückgehende Änderungen eingeschränkt; in der Praxis werden diese Ausdrücke aber auch häufig verwendet, wenn z. T. bleibende Änderungen vorliegen.

Anmerkung 2: Thixotropie und Rheopexie können formal als viskoelastisches Flüssigkeitsverhalten beschrieben werden, wenn das Fließgesetz allgemein genug formuliert wird („Flüssigkeiten mit Gedächtnis“). Die begriffliche Trennung der Thixotropie und Rheopexie von der Viskoelastizität ist dann angebracht, wenn die zu ihrer Beschreibung charakteristische Dauer groß genug ist gegenüber allen sonstigen Zeitkonstanten des viskoelastischen Verformungsprozesses und dadurch das Fließgesetz vereinfacht wird, oder wenn die der Erscheinung zugrunde liegende besondere Strukturumwandlung in dem Stoff bekannt ist.

1.3 Plastischer Stoff

Ein deformierbarer Stoff heißt plastisch, wenn er sich in einem unteren Schubspannungsbereich wie ein elastischer oder viskoelastischer Festkörper, in einem oberen Schubspannungsbereich dagegen wie eine Flüssigkeit verhält und dann die in Abschnitt 1.2 genannten Merkmale aufweist. Die Schubspannung, bei der dieser Übergang stattfindet, heißt Fließgrenze. Die Fließgrenze kann sich auch über ein enges Schubspannungsintervall erstrecken.

Anmerkung: Oberhalb der Fließgrenze wird häufiger Thixotropie, seltener Rheopexie (siehe Abschnitt 1.2.3) beobachtet.

Wie viele andere rheologische Eigenschaften, hängt die Fließgrenze vom Druck, von der Temperatur und häufig

auch von der thermischen oder mechanischen Vorgeschichte des Stoffes ab.

Liegt die Fließgrenze eines plastischen Stoffes bei so kleinen Schubspannungen, daß der betrachtete Verformungsprozeß durch sie nicht wesentlich beeinflußt wird, so ist der Stoff angenähert als Flüssigkeit zu behandeln. Andernfalls erscheint die Fließgrenze als zusätzliche Konstante im Stoffgesetz.

2 Stoffgesetze

2.1 Rheologische Stoffgesetze

Der quantitative Zusammenhang zwischen den Spannungen und Verformungen eines Stoffes heißt rheologisches Stoffgesetz. Dieses hat in allgemeiner Form den Charakter einer Funktionalbeziehung zwischen den vollständigen Vorgeschichten von Spannung und Deformation. Unter gewissen einschränkenden Bedingungen kann es durch einen Satz von Differentialgleichungen beschrieben werden.

Anmerkung: Unter Vorgeschichte einer zeitabhängigen Größe versteht man ihren Verlauf für die vorangegangenen Zeiten bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt.

Ein rheologisches Stoffgesetz heißt Fließgesetz, wenn es Fließvorgänge nach Abschnitt 1.1 (Absätze a) bis c)) beschreibt. Für die in den folgenden Abschnitten dieser Norm wiedergegebenen Fließgesetze wird vereinfachend angenommen:

- Die Flüssigkeit soll homogen sein, disperse Systeme müssen als quasihomogen zu behandeln sein.
- In Ruhe soll die Flüssigkeit isotrop sein, d. h. für das Fließgesetz sollen nicht von vornherein ausgezeichnete Richtungen existieren (z. B. durch elektrische oder magnetische Felder, durch anisotrope Ordnungszustände wie in flüssigen Kristallen).

2.2 Allgemeine Form des Fließgesetzes

Für das allgemeine Fließgesetz gilt das Superpositionsprinzip nicht. Das Gesetz muß in tensorieller Form dargestellt werden.

Wenn man die Gültigkeit des Fließgesetzes nicht auf kleine Deformationen oder kleine Deformationsgeschwindigkeiten beschränkt, so müssen an die Stelle der substantiellen Zeitableitungen konvektive (d. h. auf mit dem Stoff mitbewegte Koordinatensysteme bezogene) Ableitungen treten, die nur für skalare Größen mit den substantiellen Ableitungen übereinstimmen.

Zufolge der Annahme b) in Abschnitt 2.1 sind alle Stoffkonstanten Skalare; ihr Wert hängt im allgemeinen von der Temperatur und Dichte des Stoffes ab, in besonderen Fällen auch von weiteren Zustandsparametern (siehe die Abschnitte 1.1 und 1.2.3).

2.3 Skalares Fließgesetz

Ein Fließgesetz läßt sich auf eine oder einige skalare Gleichungen reduzieren, wenn der Deformationsgeschwindigkeits-Tensor jeweils nur eine unabhängige Komponente enthält, z. B. das Geschwindigkeitsgefälle D in einer Schichtenströmung (siehe DIN 1342) oder die Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ in einer Dehnströmung (siehe Bild 1). Diese Gleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen den unabhängigen Spannungskomponenten (z. B. der Schubspannung und den Normalspannungsdifferenzen bei einer Schichtenströmung oder der Hauptdehnspannung bei einer Dehnströmung) und der jeweiligen Deformationsgeschwindigkeit.

Anmerkung: Das Fließgesetz für newtonsche Flüssigkeiten in DIN 1342 ist der einfachste Fall eines skalaren Fließgesetzes.

3 Anwendungen des skalaren Fließgesetzes

In Abschnitt 3 werden nur Fließvorgänge betrachtet, die volumenbeständig verlaufen; τ soll eine Schubspannung, $\dot{\gamma}$ eine Schergeschwindigkeit bedeuten. Bei Schichtenströmungen wird die für das Volumenelement geltende Schergeschwindigkeit durch das Geschwindigkeitsgefälle D ersetzt.

3.1 Fließgesetze für reinviskose Schichtenströmungen

3.1.1 Allgemeine algebraische Darstellung:

$$D = f(\tau) = \tau \varphi(\tau^2), \quad \tau = D \eta(D^2); \quad (1)$$

als Reihe:

$$\begin{aligned} D &= a_1 \tau + a_2 \tau^3 + a_3 \tau^5 + \dots \\ &= \tau \varphi(1 + b_1 \tau^2 + b_2 \tau^4 + \dots) \\ \tau &= c_1 D + c_2 D^3 + c_3 D^5 + \dots \\ &= D \eta(1 + d_1 D^2 + d_2 D^4 + \dots) \end{aligned} \quad (2)$$

$\varphi(\tau^2)$ heißt Fluiditätsfunktion, $\eta(D^2)$ heißt Viskositätsfunktion, φ heißt Anfangsfluidität, η heißt Anfangsviskosität.

Die Koeffizienten a_i , b_i , c_i und d_i sind weitere Stoffkonstanten der Fließgesetze.

Anmerkung: Die Reihendarstellung von D als ungerade Funktion von τ und umgekehrt drückt die Invarianz von $\varphi(\tau^2)$ und $\eta(D^2)$ gegen Vorzeichenumkehr von τ und D aus. Im Gegensatz zu einer beliebigen Potenzreihendarstellung in $|\tau|$ oder $|D|$ führen die Gleichungen (2) immer zu

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} (d\varphi/d\tau) = \lim_{D \rightarrow 0} (d\eta/dD) = 0,$$

d. h. zu newtonschem Fließen als Grenzgesetz.

$\eta(D^2)$ kann auch Scherviskositätsfunktion genannt werden, wenn sie ausdrücklich von der Dehnviskosität (siehe Abschnitt 3.4.1) unterschieden werden soll. Ähnliche Beziehungen lassen sich für die Normalspannungsdifferenzen als gerade Funktionen des Geschwindigkeitsgefälles aufstellen.

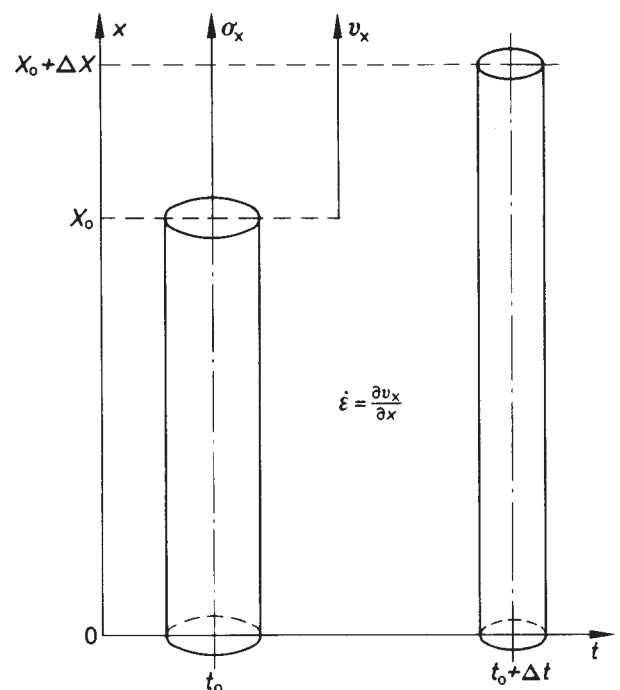


Bild 1. Schema einer Dehnströmung