

Die Cupriäthylendiamin-Viskosität von Zellstoffen und die Bestimmung des Polymerisationsgrades

VON ALBERT KÜNG UND ZENO KAUFMANN
Laboratorium der Cellulosefabrik Attisholz

Die Cellulose stellt einen makromolekularen Körper dar, dessen Bauelemente aus Glucose-Einheiten bestehen, die faden- oder kettenförmig aneinandergereiht und durch Hauptvalenzkräfte miteinander verbunden sind. Unter dem Polymerisationsgrad versteht man die Anzahl Glucose-Einheiten, welche das Makromolekül gebildet haben.

Die native Cellulose erleidet beim Aufschluß (Kochverfahren), im Verlaufe der Bleichung und eventuell anschließender Veredelung dauernde Veränderungen im Sinne einer Verkürzung der Fadenmoleküle. Dieser Abbau läßt sich durch die Bestimmung der Viskosität einer Celluloselösung messend verfolgen. Als Dispergiermittel kommt in erster Linie Kupferoxyd-Ammoniak (SCHWEIZERS Reagens) in Frage.

Die Technical Association of the Pulp and Paper Industry (T. A. P. P. I.) gab in ihren Merkblättern (Tappi Standards) eine genaue Ausführungsform unter T 206 m bekannt, welche auch in zahlreichen europäischen Laboratorien und Betrieben sich Eingang verschafft hat.

Die seit 1928 unverändert gebliebene Arbeitsweise zeichnet sich durch ihre außerordentliche Einfachheit aus, indem die Auflösung des Zellstoffes und die Messung der Viskosität in ein und demselben Gefäß vorgenommen werden können. Für die Zwecke der Betriebskontrolle scheint sie jedoch ungeeignet zu sein, da als Auflösungszeit volle 15 Stunden angegeben werden.

Nach unseren vieljährigen Erfahrungen kann aber eine Viskositätsbestimmung auch mit SCHWEIZERS Reagens in 30 bis 45 Minuten durchgeführt werden, wenn der zu prüfende gebleichte Zellstoff vorerst in die Form dünner Seidenblätter übergeführt wird, welche mit der Schere vor dem Einfüllen in das Viscosimeter in 1 bis 2 mm breite Streifen geschnitten werden. Der eine von uns¹ hat das Verfahren weiterhin verbessert, indem er eine Apparatur entwickelte, in welcher das Auflösen unter Ausschluß von Luft, d. h. in Gegenwart von unschädlichem Stick-

stoff, erfolgt. Auch die Schweden verwenden in ihrer Standard-Vorschrift (CCA 16) SCHWEIZERS Reagens und arbeiten ohne Luftabschluß beim Lösungsvorgang, indem sie das Reagens durch eine Zugabe von metallischem Kupfer vor Oxydation schützen und zur Beschleunigung der Auflösung die Cellulose mit etwas Ammoniak peptisieren. Durch die Peptisation erleidet nicht nur die Konzentration, sondern auch der Zellstoff gewisse Veränderungen, so daß Tabellen erforderlich sind, um aus den gefundenen schwedischen Zahlen die ursprünglichen Tappi-Viskositäten ablesen zu können.

Dieses altbewährte Lösungsmittel, das 15 g Kupfer, 200 g Ammoniak und 2 g Saccharose als Stabilisator im Liter enthält, soll nun versuchsweise durch Kupferäthylendiamin mit 1,0 Mol Kupfer und 2,0 Mol Äthylendiamin im Liter ersetzt werden. Diese Standardlösung wird in der Regel mit dem gleichen Volumen Wasser verdünnt, um Viskositäten in den gebräuchlichen Zahlenwerten zu erhalten. Das betreffende Merkblatt T 230 sm — 46 kann vom Sekretariat der oben genannten Gesellschaft² zum Preise von \$ --.25 bezogen werden. Von einer Beschreibung der Methode kann daher Umgang genommen werden; dagegen werden die Fachleute eingeladen, dazu kritische Stellung zu beziehen und ihre Bemerkungen dem Sekretär R. G. McDONALD zu überweisen. Wer auf die Selbsterstellung des Lösungsmittels aus Kupferhydroxyd und Äthylendiamin verzichtet, kann das gebrauchsfertige Reagens in Originalpackungen zum Preise von 15 \$ von der Ecusta Paper Corp., Pisgah Forest N. C. beziehen, doch stellt sich bei Einzelbezügen der Preis durch Frachtspesen ungefähr auf den doppelten Betrag, so daß es wünsch-

¹ A. KÜNG, Kunstseide **19**, Nr. 3, 86—90 (1937); Papierfabrikant **35**, Nr. 39, 369—373 (1937); R. SIEBER, Die chemisch-technischen Untersuchungs-Methoden der Zellstoff- und Papierindustrie, Berlin 1943.

² Techn. Ass. Pulp & Paper Ind., 122 East 42nd Street, New York 17, N. Y.

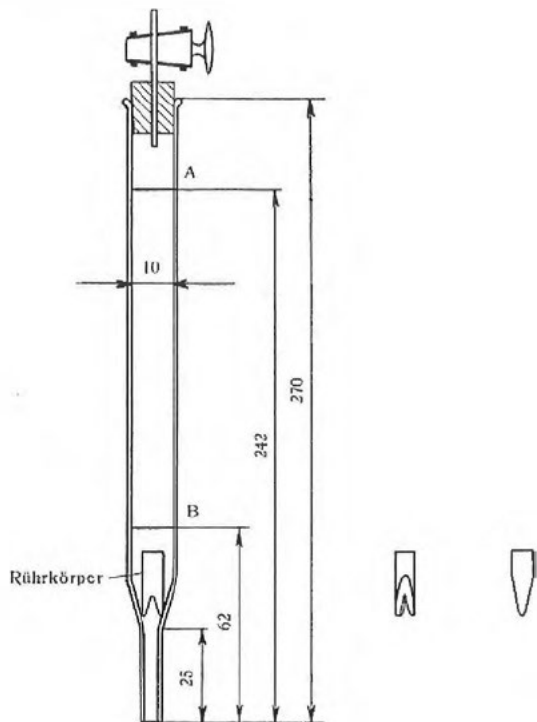


Abb. 1. Tappi-Viscosimeter mit Rührkörper

bar wäre, wenn eine Schweizer Firma die Herstellung und den Vertrieb übernehmen würde. Das neue Reagens scheint in den amerikanischen Betrieben recht gute Aufnahme gefunden zu haben, was uns veranlaßte, seine Vorzüge und Nachteile einer experimentellen Überprüfung zu unterziehen. Ferner wollten wir Vergleiche mit dem bisher allgemein gebrauchten SCHWEIZER-Reagens anstellen und haben auch zum Teil neue Formeln entwickelt für die Umrechnung der Viskosität bei beliebiger Zellstoffkonzentration auf 1prozentige Lösungen sowie zur Bestimmung der spezifischen Viskosität bei unendlicher Verdünnung $[\eta]$ und der Berechnung des Polymerisationsgrades.

Der erste, der sich mit Kupferäthylendiamin $\text{Cu}(\text{en})_2$ befaßte, war TRAUBE³. Die weitere Bearbeitung übernahmen STRAUS, LEVY und ihre Mitarbeiter vom Research Institute der *Ecusta Paper Corp.* sowie R. S. HATCH⁴ von der *Weyerhäuser Timber Co.* in Longview.

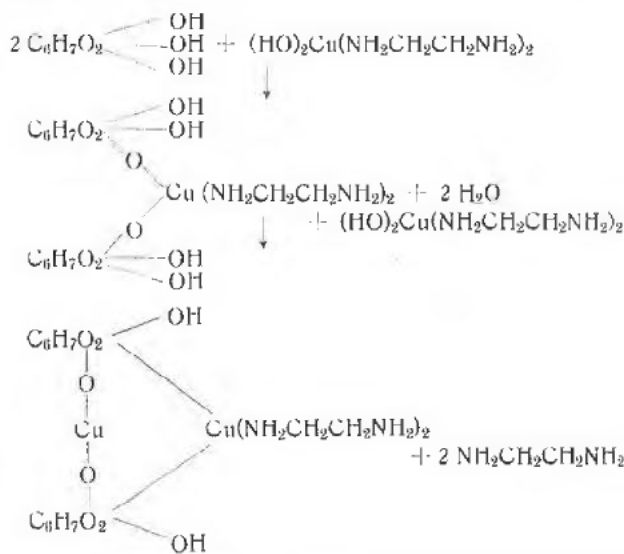
³ Ber. dtsch. chem. Ges. **44**, 3319—3324 (1911).

⁴ F. L. STRAUS und R. M. LEVY, Paper Trade J. **15**, Jan. 1942 und **30**, April 1942; R. M. LEVY und P. MUFFAT, Paper Trade J. **3**, Febr. 1944; R. M. LEVY, P. MUFFAT und W. D. HARRISON, Paper Trade J. **10**, Febr. 1944; R. M. LEVY und W. D. HARRISON, Paper Trade J. **15**, Dez. 1944; R. S. HATCH, Pacific Pulp & Paper Ind. **15**, Nr. 10, 13—15 (1942); R. S. HATCH, Ind. Eng. Chem. (Anal. Ed.) **16**, 104—107 (1944); R. S. HATCH, R. N. HAMMOND und J. J. MCNAIR, Techn. Ass. Papers **25**, 426—942 (1941); E. P. WOOD, Techn. Ass. Papers **27**, 383 (1944); A. J. CORREY, Techn. Ass. Papers **27**, 371 (1944).

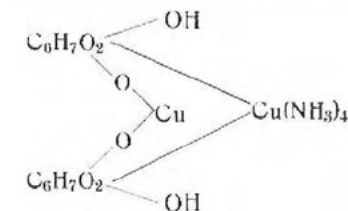
Lösungsvorgänge in Kupferäthylendiamin

Die Auflösung von Kupferhydroxyd in Äthylendiamin, die mit einer Wärmeentwicklung verbunden ist, erfolgt stets in dem gleichen molekularen Verhältnis, gleichgültig, ob es sich um konzentrierte oder verdünnte Lösungen handelt. Auf zwei in Lösung befindliche Molekulargewichte Diamin wird immer ein Molekulargewicht Kupfer aufgenommen. Daraus kann geschlossen werden, daß eine bestimmte, innerhalb gewisser Temperatur- und Druckgrenzen beständige Verbindung ein Cupriäthylendiaminhydroxyd sich bildet, was bei dem SCHWEIZER-Reagens nicht der Fall ist.

Beim Auflösen von Cellulose spielen sich folgende Reaktionen ab:



Auch bei SCHWEIZER-Reagens treffen wir analoge, aber nicht so stöchiometrische Verhältnisse. Der Komplex kann wie folgt geschrieben werden:



Es handelt sich also um eine Kupfertetramin-Kupfercellulose.

Theoretisches über die verwendeten Meßgeräte

1. Das Tappi-Viscosimeter. Das Tappi-Viscosimeter (Abb. 1) ist ein Glasrohr, das unten mit einer kurzen Kapillare versehen ist. Es dient, wie bereits ausgeführt wurde, sowohl als Auflösungs- wie auch als Meßgerät. Wegen seiner Einfachheit und leichten Handhabung hat es sich überall in den Zellstoffabriken einführen und halten können, obwohl es an sich einige Nachteile aufweist, die ganz genaue Messungen verunmöglichen.

Das Fadenmolekül ist stark abhängig vom Druckgefälle. Bei kleinem Strömungsgefälle können sich unter anderem lose Strukturen bilden durch Zusammenlagerung der Teilchen zu netzartigen Aggregaten, die die Viskosität heraufsetzen. Bei großem Strömungsgefälle hingegen kann das Fadenmolekül, das als Knäuel in einer Lösung vorliegt, teilweise entknäuel werden, wodurch die Viskosität kleiner wird.

Im Tappi-Viscosimeter haben wir starke Schwankungen des Strömungsgefälles. Durch Untersuchungen über die Kräfteverteilung im Viscosimeter kommen wir auf folgende Differentialgleichung:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{dv}{dx} = - \frac{dp(h)}{\eta l} x.$$

- η = Viskosität der Lösung
- $dp(h)$ = Druckdifferenz als Funktion der Höhe
- $\frac{dp(h)}{\eta l}$ = Störungsglied der Differentialgleichung
- l = Länge der Kapillare

Für das Geschwindigkeitsgefälle erhält man:

$$\frac{dv}{dx} = - \frac{dp(h)}{2\eta l} x + \frac{c}{x}.$$

Der Druck über der Kapillare ändert fortwährend seine Größe mit der Höhe der Flüssigkeitssäule. Bei Berücksichtigung dieser Umstände erhält man als Geschwindigkeit:

$$v = - \frac{K}{4} r^2 h_0 e^{-kt} \quad \text{und} \quad K = \frac{r^2 \pi \rho_H g}{\eta l}$$

- h = Höhe der Flüssigkeitssäule über der Kapillare
- e = Basis des natürlichen Logarithmus
- r = Radius der Kapillare
- k, K = Konstanten

2. Das HÖPPLER-Viscosimeter. Zur Bestimmung der Viskosität nach der Fallmethode wird oft das HÖPPLER-Viscosimeter verwendet. Unter der konstanten Schwerkraft haben wir im stationären Fall keine Beschleunigung bzw. Verzögerung. Die Verhältnisse sind hier idealer und geben im allgemeinen exaktere Resultate. Außer einer konstanten Größe, die allein durch das Verhältnis von Kugeldurchmesser zu Rohrdurchmesser bedingt ist, können alle Größen gemessen werden. Man erhält als Geschwindigkeit:

$$v = \frac{2}{9\eta} a^2 g (\rho_m - \rho_n) c$$

- ρ_m = spezifisches Gewicht der Metallkugel
- ρ_n = spezifisches Gewicht der Flüssigkeit
- a = Kugeldurchmesser
- A = Rohrdurchmesser
- c = Konstante, abhängig von $\frac{a}{A}$
- g = Erdbeschleunigung

Viskositätsmessungen nach der Tappi-Methode bei verschiedenen Zellstoffkonzentrationen

Die Frage, in welcher Weise die Viskosität von fadenförmigen Makromolekülen mit steigender Konzentration sich ändert, ist schon vielfach bearbeitet worden. Eine Reihe von Formeln wurde schon vorgeschlagen. Die bekannteste ist diejenige von STAUDINGER:

$$\lg \frac{\eta_{spez}}{c} = \lg [\eta] + c K_{st}; \quad \eta_{spez} = \frac{\eta}{\eta_0} - 1;$$

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{spez}}{c} \quad (1)$$

- η = Viskosität der Lösung
- η_0 = Viskosität des reinen Lösungsmittels
- $[\eta]$ = spezifische Viskosität bei unendlicher Verdünnung
- K_{st} = Steigungskonstante
- c = Konzentration in g/l

K_{st} ist ein Maß der Steigung der Viskosität mit der Konzentration. Die STAUDINGERSche Formel gilt nur streng für kleine Zellstoffkonzentrationen. Für eine rechnerische Erfassung der Eigenschaften der Cellulose aus einer einzigen Messung ist sie, da sie zwei Unbekannte hat, nicht geeignet.

Es wurde deshalb versucht, eine Formel mit einer Unbekannten aus den experimentell gefundenen Kurven abzuleiten. Die Lösung der Aufgabe wurde dadurch erschwert, weil bei den hochpolymeren Zellstoffen die Tappi-Viskosität viel schneller als bei den niedrigpolymeren ansteigt. Über die erhaltenen Kurven orientiert Abb. 2, wo einige Zellstoffe aufgetragen sind.

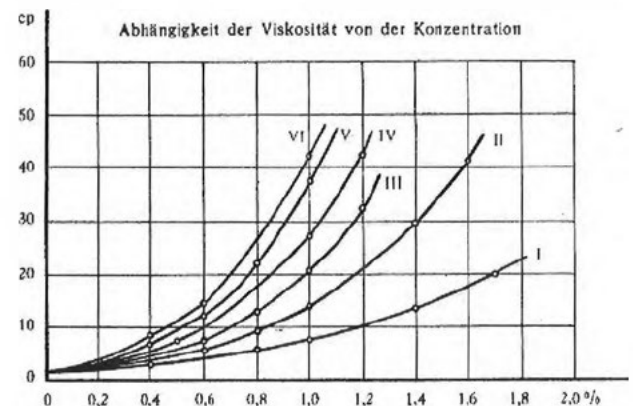


Abb. 2

Es wurde eine Exponentialgleichung aufgestellt, welche in dem für die Tappi-Methode günstigen Bereich gute Resultate liefert.

$$\eta = \eta_0 (1 + k c_1)^n \quad (2)$$

c_1 = Konzentration in Volumprozenten

Außer der Konstante k sind alle Größen bekannt und bestimmbar. k kann nach einer Messung berechnet werden. Durch Auflösung der Gleichung nach k erhält man:

$$k = \frac{10^{\frac{(\lg \eta - \lg \eta_0)}{n}} - 1}{c_1} \quad (3)$$

Der Wert des potenzierten Gliedes ist nach der Berechnung des Exponenten als Numerus in der Logarithmentafel nachzuschlagen. Wie aus den Kurven der Abb. 2 ersichtlich ist, kann der Exponent der Formel 3 nicht immer die gleiche Größe haben. Je nach der Größe der Viskosität muß er variiert werden. Die folgenden Werte beziehen sich auf eine 1-prozentige Lösung:

$$\begin{aligned} \eta < 10 \text{ cp} & \quad n = 8,5 \\ \eta = 10 - 15 \text{ cp} & \quad n = 8 \\ \eta = 15 - 30 \text{ cp} & \quad n = 7 \\ \eta > 30 \text{ cp} & \quad n = 6 \end{aligned}$$

Der Wert k ist für jeden Zellstoff eine charakteristische Größe, deshalb mußte notwendigerweise auch eine Beziehung gefunden werden für die spezifische Viskosität bei unendlicher Verdünnung, wie sie STAUDINGER definiert hat. Es wurde folgende Gleichung gefunden:

$$\frac{kn}{10} = [\eta] \quad (4)$$

Die Einfachheit dieses Gesetzes überrascht um so mehr, als bei der Bestimmung von $[\eta]$ nach STAUDINGER meistens eine längere Umrechnung vorgenommen oder zu einer graphischen Lösung gegriffen werden muß. Mit obiger Gleichung kommt man leicht und schnell ans Ziel.

Nach Kenntnis der Größe $[\eta]$ kann man sofort den Polymerisationsgrad bzw. das Molekulargewicht berechnen.

$$P = \frac{[\eta]}{K_m}; \quad M = P \cdot 162 \quad (5)$$

P = Durchschnittspolymerisationsgrad
 M = Durchschnittsmolekulargewicht

Da M große Zahlen gibt, wird im allgemeinen nur mit P gerechnet. Die Cellulose stellt eine polymolekulare Verbindung dar, deshalb kann nur ein Mittelwert des Polymerisationsgrades erhalten werden. Je nach der Methode, die man zur Bestimmung verwendet, werden verschiedene Polymerisationsgrade bei der Cellulose erhalten. Folglich haben wir auch verschiedene K_m -Werte.

Für den mittleren Polymerisationsgrad P in Cuoxam wird allgemein eine Konstante $K_m = 5,0 \cdot 10^{-4}$ angenommen.

Aus der folgenden Wertetabelle (Tab. 1) soll die Leistungsfähigkeit der gefundenen Formel gezeigt werden. Die Messungen wurden mit SCHWEIZER-

Tab. 1
 Bestimmungen in SCHWEIZER Reagens

Qualität	Einwaage in %	cp gef.	cp ber.	n	k	$[\eta]$ ber.	$[\eta]$ Staudinger	P
I Sulfat	0,4	2,8	2,8	8,5	0,218	0,185	0,186	372
	0,8	5,6	5,5					
	1,0	7,5	7,5					
	1,4	13,3	13,4					
	1,7	20,4	20,5					
II Sulfat	0,6	6,3	6,1	7	0,388	0,275	0,272	545
	0,8	9,2	9,3					
	1,0	13,9	13,9					
	1,4	29,1	29,0					
	1,6	41,9	41,2					
III RKN	0,6	7,4	7,9	7	0,469	0,328	0,327	555
	0,8	13,0	13,0					
	1,0	20,3	20,5					
	1,2	32,7	32,0					
IV RKN	0,5	7,1	7,1	7	0,526	0,375	0,378	755
	1,0	27,0	27,0					
	1,2	48,4	43,0					
V EBN	0,4	6,3	6,4	6	0,728	0,437	0,440	872
	0,6	12,2	12,3					
	0,8	22,0	21,5					
	1,0	37,6	37,3					
VI EBN	0,4	7,2	7,0	6	0,769	0,462	0,462	925
	0,6	13,6	13,6					
	1,0	43,0	43,0					

Reagens nach der Tappi-Methode ausgeführt und die erhaltenen Resultate nach STAUDINGER und der obigen Formel vergleichsweise weiter ausgewertet.

Die Viskosität η_0 des SCHWEIZER-Reagens, nach Tappi-Normen eingestellt, beträgt 1,4 cp bei 20° C, bei welcher Temperatur die Messungen ausgeführt wurden.

Viskositätsmessungen mit Kupferäthylendiamin als Lösungsmittel

Nachdem die Messungen mit SCHWEIZER-Reagens gute Resultate lieferten, war es interessant, auch die Verhältnisse beim neuen Lösungsmittel zu prüfen. Es wurde folgende Lösung verwendet:

Cu	32,71 g/l = 0,514 Mol
Äthylendiamin	61,5 g/l = 1,025 Mol
Cu : Äthylendiamin	1 : 2
Spezifisches Gewicht	1,0518
η_0 25°	1,11 cp

1. *Strömungsmethode.* Es wurde wieder eine Konzentrationsreihe an den verschiedensten Zellstoffen ausgeführt und diese mit der Cuoxammethode verglichen. Es ließ sich die gleiche Formel anwenden, um die Viskosität bei jeder beliebigen Konzentration berechnen zu können (Tab. 2).

Tab. 2

Qualität	Ein- waage in %	cp Tappi gef.	cp Cu(en) ₂ gef.	cp Cu(en) ₂ ber.	n für Cu(en) ₂	k Cuox.	k Cu(en) ₂
547 Buche	0,3	2,64	3,2	3,1	7	0,313	0,525
	0,5	4,04	6,0	5,7			
	0,7	5,85	10,4	10,2			
	1,0	12,50	21,3	21,3			
546 RKN	0,3	2,78	4,5	3,5	6	0,469	0,790
	0,5	4,85	8,6	8,2			
	0,75	9,65	18,0	18,0			
	1,0	20,3	36,5	36,5			
	1,2	32,0	63,1	60,9			
483 RKN	0,3	3,8	5,7	5,5	6	0,512	0,964
	0,5	5,45	12,5	12,4			
	0,75	13,4	28,5	28,2			
	1,0	24,9	63,3	63,0			
	1,2	89,0	109,0	108,0			
542	0,4	5,5	8,0	8,2	6	0,657	0,993
	0,7	13,6	26,5	26,3			
	1,0	29,0	72,0	71,8			
510	0,4	6,6	10,4	10,4	6	0,744	1,128
	0,7	17,2	34,5	36,0			
	0,85	26,4	63,0	62,5			
	1,0	39,5	112,6	110,0			
407 RKN	0,2	3,3	4,2	3,45	6	0,777	1,180
	0,4	7,0	11,3	11,3			
	0,6	13,9	27,4	27,5			
	0,8	25,4	59,0	59,5			
	1,0	44,0	121,5	119,5			

Für den Exponenten gelten die gleichen Regeln. Die Wahl vereinfacht sich aber. Es kann meistens der Wert 6 in die Gleichung eingesetzt werden. Die absolute Viskosität, die spezifische Viskosität bei unendlicher Verdünnung sowie die STAUDINGERSche Steigungskonstante sind bei der Bestimmung mit Kupferäthylendiamin bedeutend größer. Diese Tatsache kann so gedeutet werden:

1. Das Lösungsmedium bzw. dessen Eigenviskosität hat an der Erhöhung keinen Anteil, da diese kleiner ist.
2. Cuoxam greift die Cellulose sicher stärker an, doch ist kaum zu erwarten, daß ein solcher Abbau stattfindet, woraus dann die kleinere Viskosität resultieren würde.
3. Hier handelt es sich sicher um eine Erhöhung der Viskosität durch die sogenannte innere Viskosität. Das heißt: das Molekül ist sterisch und energetisch anders gebaut als bei Cuoxam. Der Cellulose-Kupfer-Äthylendiamin-Komplex hat durch seine Konstitution bedeutend größere sterische und energetische Hinderungen bei einer Konstellationsänderung zu überwinden. Somit ist die freie Drehbarkeit der Moleküle gehemmt und die Moleküle stellen den Kräften einer strömenden Lösung einen größeren Widerstand entgegen als der Kupfer-

cellulose-Kupferammoniak-Komplex, was somit die Viskosität wesentlich vergrößert.

4. Der Unterschied in den K_m -Werten ist auch dadurch bedingt, daß die Cellulose, wie auch ihre Derivate, verschieden stark im Lösungsmittel solvatisiert werden. Die stärker solvatisierten geben höherviskose Lösungen.

2. Kugelfallmethode. Es wurde mit dem HÖPPLER-Viscosimeter gearbeitet. Ohne genauere Kenntnisse über das Verhalten der Fadenmoleküle in einer strömenden Lösung könnte man erwarten, daß die Strömungsmethode und die Kugelfallmethode bei gleicher Zellstoffkonzentration und gleichem Lösungsmittel die gleichen Resultate liefern würden. Da bei beiden Methoden bezüglich Strömungsgefälle nicht die gleichen Verhältnisse vorherrschen, sind jedoch die Resultate verschieden. Bei der Tappi-Methode läuft die Größe des Strömungsgefalles asymptotisch einem Grenzwert entgegen. Deshalb wird die Viskosität scheinbar gegen den Schluß der Messung größer. Dies ist durch Aggregation und Übergang in den ungeordneten Zustand sowie durch sekundäre Bewegung, wie BROWNSche Bewegung, Diffusion usw., bedingt. Im HÖPPLER-Viscosimeter herrschen während der ganzen Messung immer die gleichen Strömungsverhältnisse. Die Resultate nach HÖPPLER werden daher etwas kleiner. Für die Berechnung gilt das gleiche wie für die Tappi-Methode (Tab. 3).

Tab. 3

Qualität	%	cp gef.	cp ber.	n	k
547	1	18,5	18,5	7	0,495
	0,75	10,5	10,1		
	0,5	5,45	5,25		
546	1	29,4	29,4	6	0,726
	0,75	15,6	15,1		
	0,5	6,85	7,1		
483	1	51	51	6	0,893
	0,75	24,8	24,0		
	0,5	10,9	10,2		
542	1	57,2	57,2	6	0,929
	0,75	25,5	26,4		
	0,5	10,8	10,9		
510	1	83,6	83,6	6	1,054
	0,75	34,3	36,4		
	0,5	13,2	14,0		
407	1	89,0	89,0	6	1,076
	0,75	39,0	38,6		
	0,5	14,3	14,6		

Polymerisationsgrade

Eine Cellulose ist eigentlich erst durch den Durchschnittspolymerisationsgrad gut charakterisiert. Es

kann angenommen werden, daß die Cellulose immer denselben Polymerisationsgrad besitzt, gleichgültig, in welchem Lösungsmittel derselbe bestimmt wird. Es ist daher nötig, andere Werte für K_m einzuführen. Da uns nur die Viscosimeter-Methode zur Verfügung stand, mußten die K_m -Werte berechnet werden. Es wurde der Polymerisationsgrad der Cellulose in Cuoxam bestimmt. Aus den gefundenen Werten wurden für die gleiche Cellulose in Kupferäthylendiamin die Konstanten berechnet. Für die Strömungsmethode wie für die Kugelfallmethode mußten verschiedene Werte eingeführt werden:

Für die Strömungsmethode $K_m = 7,5 \cdot 10^{-4}$ für
 Für die Kugelfallmethode $K_m = 7,0 \cdot 10^{-4}$ Cufen₂

Zusätzliche Bemerkungen

Mit Kupferäthylendiamin können beide Methoden mit Erfolg angewendet werden. Da die Viskosität in Kupferäthylendiamin rasch ansteigt, ist es empfehlenswert, niedrige Konzentrationen zu wählen, so daß die gemessenen Zeiten zwischen ca. 30-90 Sekunden zu liegen kommen. Längere Zeitdauer ist bei beiden Methoden nicht zu empfehlen, weil die Genauigkeit stark herabgesetzt wird. Die absolute Viskosität einer 1prozentigen Lösung sagt nicht viel über die Eigenschaft aus, und zudem muß immer das Lösungsmittel angegeben werden. Durch die Einführung des Polymerisationsgrades wäre eine Größe aufgestellt, die für alle Lösungsmittel schnell berechenbar wäre und

die mehr von den Eigenschaften des untersuchten Zellstoffes aussagen würde.

Beispiel: Durch Bestimmung einer 1,0prozentigen Lösung von Cellulose in Kupferäthylendiamin wurde als absolute Viskosität 63,0 cp gefunden. Nun interessiert vor allem:

1. Wie groß ist die Viskosität η einer 0,5prozentigen Lösung?
2. Wie groß ist $[\eta]$?
3. Wie groß ist der Durchschnittspolymerisationsgrad P ?

gegeben: $\eta_0 = 1,11$ cp gesucht: η einer 0,5prozentigen Lösung
 $\eta = 63$ cp $[\eta]$ und P
 $c_1 = 1\%$
 $\eta > 30$ cp, $n = 6$

$$k = \frac{10^{\frac{\lg \eta - \lg \eta_0}{c_1}} - 1}{c_1} = \frac{10^{\frac{\lg 63 - \lg 1,11}{6}} - 1}{1} = \frac{10^{1,29233} - 1}{1} = 0,960$$

Wie groß ist η einer 0,5prozentigen Lösung?
 $\eta = \eta_0 (1 + kc_2)^n = 1,11 (1 + 0,960 \cdot 0,5)^6 = 1,11 (1,48)^6$
 $\eta = 11,66 \sim 11,7$ cp

$$[\eta] = \frac{k \cdot n}{10} = \frac{0,960 \cdot 6}{10} = 0,576$$

$$P = \frac{[\eta]}{K_m} = \frac{0,576}{7,6 \cdot 10^{-4}} = 760$$