

22 Untersuchung von Zellstoffen 2 (Chemische Untersuchungen)

22.1 Allgemeines Prinzip der chemischen Analyse

Will man herausfinden, wie die chemische Zusammensetzung eines Faserstoffs ist (z.B. sein Gehalt an Lignin), oder welche besondere für seine Eigenschaften wichtige chemische Gruppen (z.B. saure Carboxylgruppen) er enthält, braucht man eine chemische Reaktion, die exklusiv mit der gesuchten Funktion reagiert.

Dabei wird nur eine Komponente der Probe in charakteristischer Weise und komplementär dazu das Reagenz verändert (siehe Schema Abbildung 22- 1). An den Veränderungen kann man das Vorhandensein der gesuchten Komponente erkennen. Dient die Analyse nur zur Identifizierung einer Komponente, spricht man von qualitativer, wird deren genaue Menge (Konzentration) ermittelt, dann handelt es sich um eine quantitative Analyse.

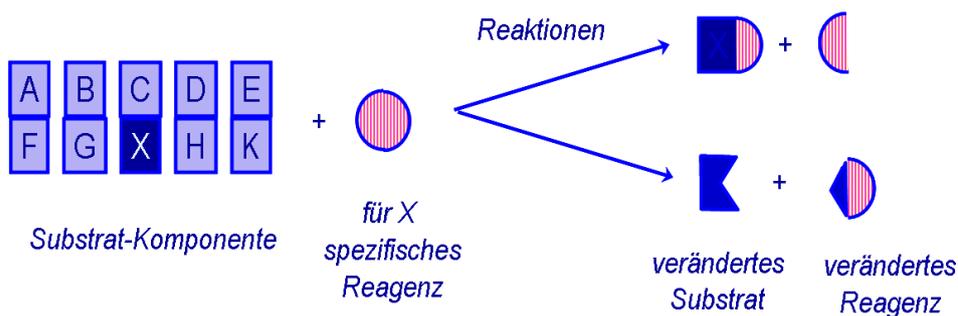


Abbildung 22- 1: Schema der qualitativen Identifizierung oder quantitativen Bestimmung einer chemischen Komponente einer Probe

Geeignete Reaktionen müssen nicht unbedingt chemische Reaktionen im engeren Sinn (z.B. Salzbildung, Verseifung, Veresterung, Veretherung) sein, sondern es kann sich auch um eine rein physikalische Wechselwirkung handeln (z.B. Absorption von Photonen [sichtbares Licht, UV-, IR- Röntgenstrahlung]).

Solche selektive Reaktionen am Zellstoff können in verschiedener Weise wirken:

- Die gesuchte Komponente wird selektiv im Zellstoff bestimmt (Beispiel: Kappa-Zahl)
- Die gesuchte Komponente wird selektiv aus dem Zellstoff herausgelöst und anschließend bestimmt (Beispiel: Extraktstoffe)

- Begleitsubstanzen werden entfernt, die gesuchte Komponente bleibt zurück (Beispiel: Halse-Lignin; R-Werte)

Eine Möglichkeit ist, die Komponenten - entweder direkt oder nachdem man sie zuvor durch eine chemische Reaktion gezielt verändert hat - durch ihre Löslichkeit in einem bestimmten Milieu zu unterscheiden.

Unterschiede in der Löslichkeit beruhen auf Unterschieden in der Zusammensetzung und der molekularen Struktur der in einer Probe vorhandenen Stoffe.

Solche Substanzunterschiede können sein:

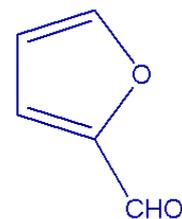
- Vorhandensein polarer Gruppen (verbessert die Löslichkeit in polaren Lösungsmitteln)
- Vorhandensein unpolarer Gruppen (verbessert die Löslichkeit in unpolaren Lösungsmitteln)
- Zugänglichkeit der funktionellen Gruppen; gut zugängliche Gruppen tragen mehr zur Löslichkeit bei (Beispiel: Unterschied Cellulose / Stärke)
- Molmasse: Löslichkeit sinkt allgemein mit steigender Molmasse

22.2 Kohlenhydratzusammensetzung

Vor allem durch den Gehalt an Polyosen sind in Faserstoffen neben der Glucose noch andere Zucker als Bausteine von Polysacchariden enthalten. Durch Totalhydrolyse der Polysaccharide werden diese in ihre Zuckerbestandteile gespalten. Anschließend können diese chromatographisch getrennt und quantitativ bestimmt werden.

22.2.1 Bestimmung der Pentosen (Pentosengehalt)

Die Pentosane (= Polyosen, die Pentosen enthalten) können relativ einfach durch Hydrolyse mit HBr, wobei flüchtiges Furfural entsteht, bestimmt werden.



Furfural

Furfural wird abdestilliert und dessen Menge über einen Farbkomplex mit Orcinol oder Anilinacetat kolorimetrisch gemessen (Bestimmung der Konzentration über die Farbtiefe (Extinktion) der Lösung).

22.2.2 Beständigkeit gegen Natronlauge (Alkali-resistenz)

22.2.2.1 R-Werte (Alkali-Rückstand)

R-Werte werden nach DIN 54 355 an bei 40°C über Nacht umluftgetrocknetem Zellstoff bestimmt. Sie bezeichnen den Anteil des (aschefrei gerechneten) Zellstoffs, der in Natronlauge bestimmter Konzentration unlöslich ist.

Bevorzugte Laugenkonzentrationen: 10% und 18% → R10 und R18

Man lässt NaOH eine Stunde lang bei 20°C einwirken. Der unlösliche Rückstand wird über Glassinterfilter abgetrennt, mit Essigsäure gewaschen, getrocknet und ausgewogen.

Alternativ wird der lösliche Bestandteil (sollte 100-R sein) angegeben.

S18 gibt den in 18% NaOH löslichen Probenanteil wieder

R18 bezeichnet den unlöslichen Anteil, er besteht fast ausschließlich aus Cellulose, während die nicht-cellulosischen Anteile gelöst wurden.

Verwandt ist die Angabe des α -Cellulosegehalts. Dieser wird mit 17,5% NaOH bestimmt und entspricht daher R17,5.

Wie zu erwarten, lösen unterschiedlich konzentrierte Laugen unterschiedlich viel Material aus dem Zellstoff. Die Löslichkeitskurve (Abbildung 22- 2) steigt aber nicht monoton an, sondern durchläuft ein Maximum bei ca. 10%. Dies beruht darauf, dass in höher konzentrierter Lauge die Zellwand stark quillt, sich aber durch die Fibrillenstruktur nicht genügend ausdehnen kann. Dadurch wird die Zellwandstruktur stark verspannt und die Diffusion und damit der Lösevorgang erheblich behindert.

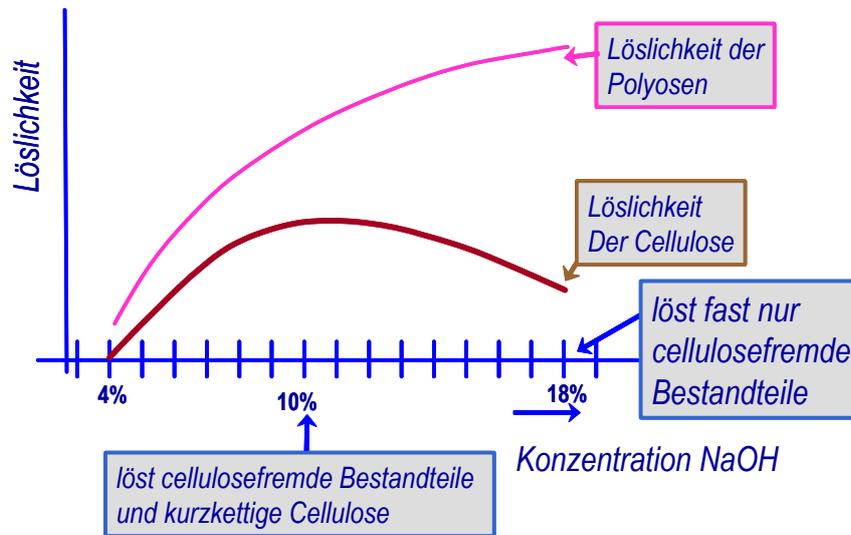


Abbildung 22- 2: Löslichkeit von Anteilen eines Zellstoffs in NaOH in Abhängigkeit von der Laugenkonzentration

22.2.2.2 α -, β - und γ -Cellulose

Einfache, grobe Charakterisierung der Polysaccharidkomponenten anhand ihrer Löslichkeit wird in Abbildung 22- 3 schematisch veranschaulicht:

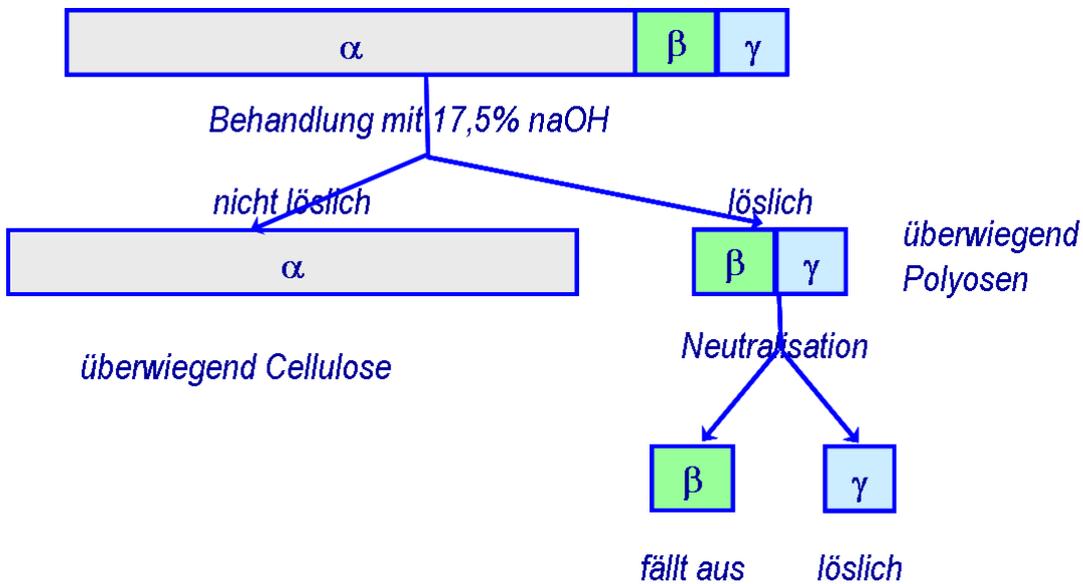


Abbildung 22- 3: Schema der Bestimmung von α -, β - und γ -Cellulose

22.3 Gehalt an anorganischen Bestandteilen

22.3.3 Aschebestimmung

22.3.3.1 Gesamtasche

Bei Veraschung bei 575 (± 25) °C an Luft in einem Porzellantiegel verbrennen die organischen Verbindungen und nur anorganische Verbindungen bleiben zurück. Deren Menge wird nach dem Auskühlen unter Feuchtigkeitsausschluss durch Auswiegen bestimmt.

22.3.3.2 Säure-lösliche Asche

Die anorganischen Elemente bilden während der Veraschung in Anwesenheit von Luft-sauerstoff Oxide oder Carbonate. Diese sind meistens säurelöslich. Nach Lösung der Asche in Säure bleibt praktisch nur säureunlösliches SiO₂ (Kieselsäure) zurück.

22.3.3.3 Glühverlust

Beim Glühen der Asche bei 800 (± 25) °C (bei Papier 900 (± 25) °C) werden Carbonate, insbesondere Calciumcarbonat zersetzt $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Es bleibt CaO zurück. Dieses wird ausgewogen und das Ergebnis auf CaCO₃ umgerechnet

22.3.4 Identifizierung der Salze

Die einzelnen Elemente können einerseits durch klassische nasschemische Analyse identifiziert und bestimmt werden. Wegen des dabei notwendigen hohen Arbeitsaufwandes werden wenn möglich immer mehr physikalische, apparative Analysemethoden herangezogen:

Moderne apparative Methoden:

- Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)
- Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie

22.4 Bestimmung des Ligningehalts

22.4.1 Ligningehalt nach Halse

Der Ligningehalt wird an bei 40°C über Nacht umluftgetrocknetem Zellstoff bestimmt.

Dabei bedient man sich einer selektiven Totalhydrolyse der Polysaccharide zu löslichen Zuckern durch rauchende Salzsäure mit Schwefelsäurezusatz (oxidierende Säuren würden auch Lignin angreifen). Die abgebauten Zucker sind in Wasser löslich und können ausgewaschen werden. Der unlösliche Rückstand besteht aus reinem Lignin. Im Gegen-

satz zu Alkalien lösen Säuren Lignin praktisch nicht. Bei der Prozedur kann trotzdem auch etwas Lignin abgebaut werden und verloren gehen.

Der Filtrerrückstand wird abfiltriert, gewaschen, getrocknet und gewogen.

22.4.2 Aufschlussgrad

Der Aufschlussgrad gibt an, wie weit das Lignin durch den Aufschluss entfernt wurde. Er wird indirekt über das noch vorhandene Lignin beschrieben und ist damit ein indirektes Maß für Restlignin.

22.4.2.1 Kappazahl

Die Kappa-Zahl wird nach DIN 54 357 am feuchten Zellstoff gemessen. Dabei bestimmt man den Verbrauch von KMnO_4 in schwefelsaurer Lösung. Zunächst wird ein Überschuss von KMnO_4 -Lösung zur Zellstoffsuspension zugegeben.

Dabei wird ein Teil des Lignins nach folgender Reaktion reduziert:



Nach 10 min Einwirkung wird KJ-Lösung, wieder im Überschuss, zugesetzt. Das KJ reduziert nun den noch vorhandenen Überschuss von Permanganat, dabei wird Iod (I_2) gebildet.



Die Menge an Iod wird mit Hilfe von Stärke als Katalysator (bildet mit Iod einen blau gefärbten Komplex) mit Natriumthiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) titriert.



Wenn das I_2 verbraucht ist, verschwindet auch die blaue Farbe des Stärkekomplexes.

Angegeben wird schließlich die Menge in Milliliter an 0,02 m- KMnO_4 -Lösung, die 1 g atro Zellstoff verbraucht. Diese Zahl ist die Kappa-Zahl.

22.4.2.2 ROE- Zahl und Chlorzahl

Die ROE-Zahl wird dadurch bestimmt, dass man Chlorgas (Cl_2) in einem geschlossenen Gefäß mit dem feuchten Zellstoff reagieren lässt. Dabei reagiert das Lignin wie bei der Chlor-Bleiche. Der Cl_2 -Verbrauch wird bestimmt (z.B. durch die Druckabnahme) und als Maß für den Restligningehalt angegeben.

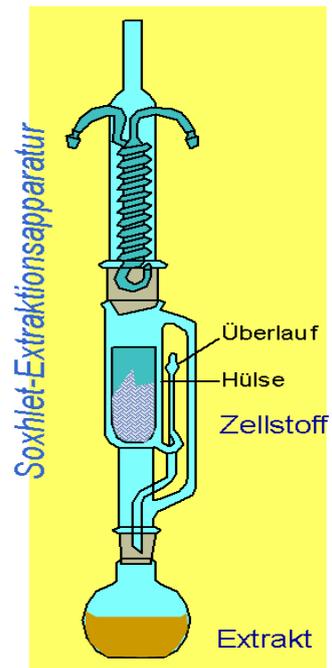
22.4.3 Gehalt an Extraktstoffen

22.4.3.1 Aceton-Extrakt

Der Anteil von organisch extrahierbaren Stoffen („Extraktstoffe“ überwiegend Harze) wird nach DIN EN ISO 14453 an bei 40°C über Nacht umluftgetrocknetem Zellstoff bestimmt.

Zur Extraktion des Zellstoffs im Soxhlet-Apparat verwendet man heute Aceton (CH_3COCH_3). Die Extraktionslösung wird eingedampft und der Rückstand (die gelösten Bestandteile) werden gravimetrisch bestimmt.

Früher wurde als Extraktionsmittel sehr häufig Dichlormethan ($\text{DCM} = \text{CH}_2\text{Cl}_2$) benutzt. Dieses ist wohl ein ausgezeichnetes Lösungsmittel, aber als Chlorwasserstoff toxisch und ökologisch schädlich



Zu den auf diese Weise erfassten Extraktstoffen gehören:

- Harze
- Gerbstoffe
- Lignane (Lignin-Abbauprodukte) nicht Lignin

22.5 Bestimmung chlor-organischer Verbindungen (OX)

Begriffe:

- TOX = total organic halogen: in der Probe enthaltene Menge OX
- EOX = extractable organic halogen: extrahierbarer Anteil
- AOX = adsorbable organic halogen. Adsorbierbarer Anteil (z.B. die Verbindungen, die aus Abwasser an Aktivkohle gebunden werden)

Messprinzip:

- Probe wird im Sauerstoffstrom verbrannt
- Bildung von H_2O ; CO_2 und HX (z.B. HCl) aus dem organischen Material. Anorganisches Halogenid (z.B. NaCl) reagiert nicht zu HX
- Das entstehende Halogenid wird in eine Lösung mit Silberionen geleitet
- Schwerlösliches Silberhalogenid fällt aus

- Die Konzentrationsänderung wird elektrolytisch bestimmt

22.6 UV/VIS-Spektroskopie

Die Spektroskopie benutzt als „Reagenz“ Photonen und die Tatsache, dass Photonen bestimmter Energie (bzw. Wellenlänge) selektiv von bestimmten Gruppen absorbiert werden.

Wellenlängenbereiche:

- VIS sichtbarer Wellenlängenbereich 400 – 700 nm
- UV < 400 nm (UV-A: 400–320 nm, UV-B: 320–280 nm, UV-C: 280–200 nm)

Die Lichtabsorption erfolgt durch selektive Anregung von Elektronen in den Molekülen. In Primärfaserstoffen kann z.B. auf diese Weise der Ligningehalt ermittelt werden (Abbildung 22- 4). Dabei wird die Absorption im Maximum der Absorptionskurve (Abbildung 22- 4) gemessen und daraus nach dem Lambert-Beerschen Gesetz

$$E = \log \frac{I_{\text{Probe}}}{I_{\text{Lösungsmittel}}} = \epsilon \cdot c \cdot d$$
 die Konzentration c des Lignins berechnet. Der Absorptionskoeffizient ϵ muss zuvor durch Eichung mit einer bekannten Menge an Lignin bestimmt werden.

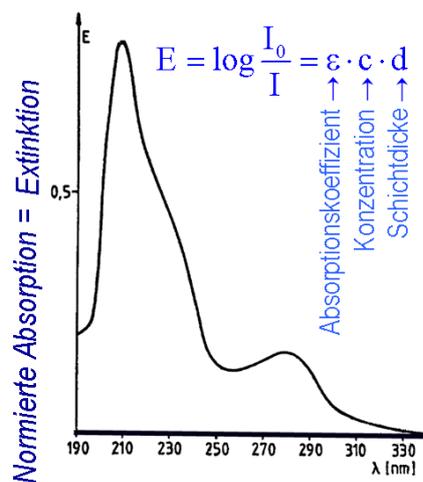


Abbildung 22- 4: UV-Spektrum des Lignins

In Sekundärfaserstoffen können sich auch andere Bestandteile aus dem Altpapier finden, die mit dieser Methode bestimmt werden können.

- Farbmitteln
- Lösliche Farbstoffe

- Farbpigmente
- Aufheller (starke Absorption im UV, Emission im sichtbaren Spektralbereich)

22.7 Infrarot-(IR)-Spektroskopie

Infrarot-Licht weist eine längere Wellenlänge auf als sichtbares Licht. Es kann in organischen Molekülen die unterschiedlichsten Arten von Schwingungen des Molekülgerüsts anregen. Jede einzelne dieser Schwingungsarten hat eine bestimmte Eigenfrequenz, Licht dieser Frequenz wird absorbiert. Im austretenden Licht fehlt dann ein Teil des Lichts der entsprechenden Wellenlänge (Absorptionsbande). Ein IR-Spektrum einer organischen Verbindung enthält viele Banden, deren Lage (Wellenlänge) und Größe (Absorptionsintensität) für die entsprechende organische Verbindung charakteristisch ist („Fingerprint“).

Abbildung 22- 5 zeigt ein solches Spektrum der Cellulose. Die Abhängigkeit der IR-Durchlässigkeit wird als Funktion der Wellenlänge (üblicherweise wird statt der Wellenlänge λ die Wellenzahl $1/\lambda$ als x-Achse gewählt) betrachtet.

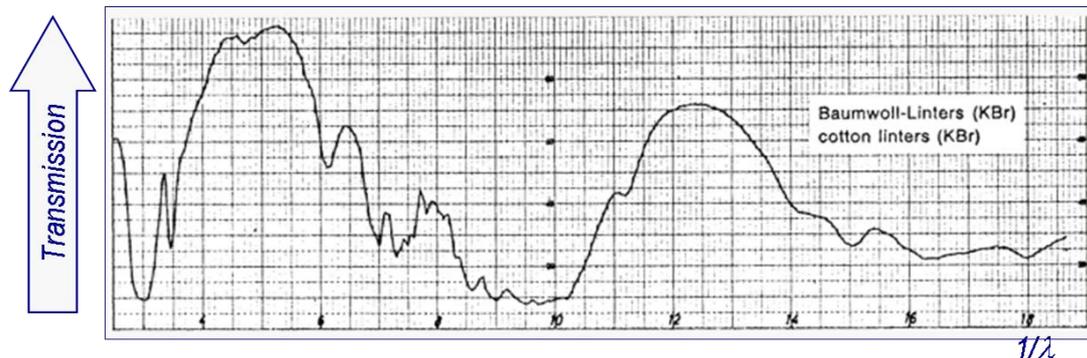


Abbildung 22- 5: IR-Spektrum von Cellulose

Es gibt Messapparaturen, die nach verschiedenen Prinzipien arbeiten. Ein Gitter-IR-Gerät benutzt Beugungsgitter zur Bestimmung der IR-Wellenlänge. Ein FTIR-Gerät (Fourier-Transform-IR) ist eine besondere apparative Ausführung mit hoher Auflösung. Es benutzt eine nach dem Dopplerprinzip funktionierende Einrichtung beweglicher Lichtquellen und Spiegel um ein definiertes zeitlich variables Wellenlängensignal zu erzeugen, das auf dem Weg einer Fourier-Transformation in das Spektrum umgerechnet wird. Die klassische IR-Analyse arbeitet im mittleren IR-Bereich (Wellenzahl: 4000–400 cm^{-1} Wellenlänge: 2,5–25 μm).

Nahes IR (NIR) (Wellenzahl: 12500–4000 cm^{-1} ; Wellenlänge: 0,8–2,5 μm) liefert stark überlagerte Spektren, die durch besondere mathematische Verfahren analysiert werden. In diesem Frequenzbereich liegen die Obertöne der Molekülschwingungen. Wasser stört

im NIR nicht, was ein besonderer Vorteil dieser Methode ist. Es ist dafür aber eine sehr aufwändige Eichung mit bekannten Substanzen erforderlich.

Auswertung von IR-Spektren:

- Für qualitative Analyse: Spektrenvergleich mit gespeicherten Spektren (Spektratenatlas)
- Für quantitative Analyse: Auswertung der Intensität einer oder mehrerer charakteristischer (gruppenspezifischer) Absorptionsbanden

22.8 Molmassenbestimmung

Durch Aufschluss und Bleiche werden die Zellwandpolymere mehr oder weniger abgebaut. Im Zellstoff ist die Kettenlänge (abhängig vom Polymerisationsgrad) der Cellulosekomponente aber sehr wichtig, weil die mechanische Festigkeit der Zellstofffaser davon stark abhängt. Die Kettenlänge wird in der Regel aus den Moleküldimensionen berechnet. Diese Moleküldimensionen müssen in Lösung bestimmt werden. Cellulose ist nur in ganz speziellen Systemen löslich:

Cellulose-Lösungsmittel:

- Metallkomplexe
 - Kupfer-Ammoniak (Schweizer-Reagenz)
 - Cuen (Kupfer-Ethylendiamin)
 - EWNN (Eisen-Weinsäure-Natriumsalz)
- Lithium-Dimethylacetamid
- Organische Lösungsmittel
 - N-Morpholin-N-Oxid

Alternativ zur Direktlösung benutzt man Cellulose-Derivate (Nitrat, Carbanilat mit Phenylurethangruppen), die in organischen Lösemitteln (z.B. Aceton) löslich sind. Diese müssen zuerst durch eine möglichst schonende chemische Reaktion hergestellt werden.

22.8.4 Viskositätsmessung

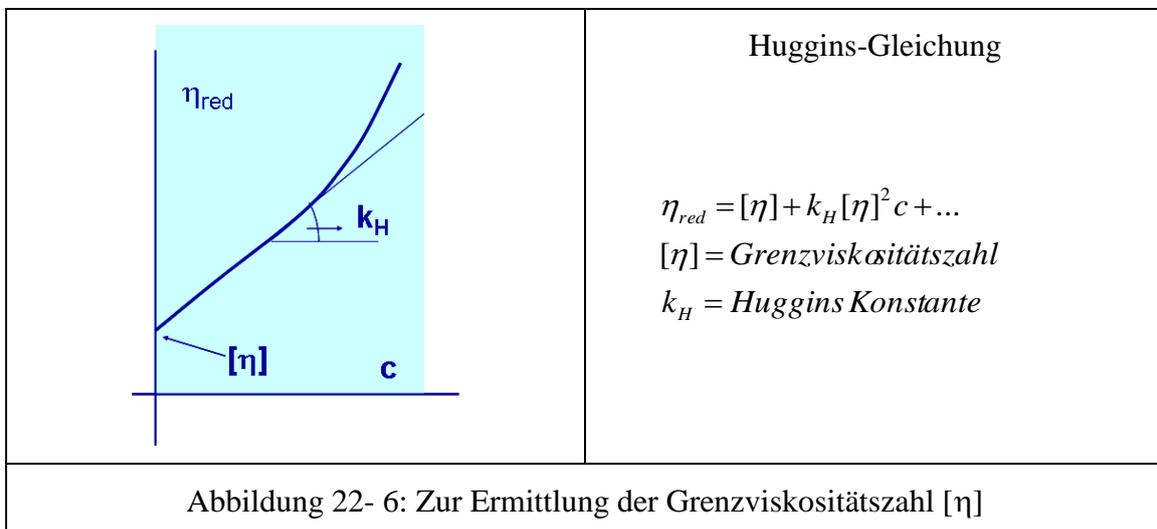
22.8.4.1 Grenzviskositätszahl $[\eta]$

Die Bestimmung der Grenzviskositätszahl liefert einen Mittelwert der Molmasse. Die Grenzviskositätszahl wird nach Zellcheming - Merkblatt IV/50/69 nach an bei 40°C über Nacht umluftgetrocknetem in EWNN gelöstem Zellstoff bestimmt.

Zunächst wird hierzu die relative Lösungsviskosität $\eta_{rel} = \frac{\eta_{Lösung}}{\eta_{Lösungsmittel}}$ von verschiedenen konzentrierten Lösungen vorzugsweise in einem Kapillarviskosimeter gemessen. Um den Einfluss der Konzentration zu eliminieren und direkt auf den und hier interessierenden Beitrag eines einzelnen Makromoleküls auf die Viskosität schließen zu können, wird auf den Zustand unendlicher Verdünnung (entsprechend verschwindend kleiner Konzentration $c \rightarrow 0$) extrapoliert.

Hierzu wird die jeweilige reduzierte Viskosität $\eta_{reduziert} = \frac{\eta_{Lösung} - \eta_{Lösungsmittel}}{c \cdot \eta_{Lösungsmittel}} = \frac{\eta_{spezifisch}}{c}$

berechnet und als Funktion der Lösungskonzentration c aufgetragen (siehe Abbildung 22- 6). Der Wert bei $c=0$ entspricht der Grenzviskositätszahl:



Alternative Berechnung der Grenzviskositätszahl $[\eta]$ nach Schulz – Blaschke:

Schulz - Blaschke -Gleichung

$$\eta_{red} = [\eta] + k_{SB} \cdot [\eta] \cdot \eta_{sp}$$

k_{SB} ...Schulz - Blaschke - Konstante

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_{LM}}{\eta_{LM}} = \eta_{rel} - 1$$

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c}$$

Die Grenzviskositätszahl hängt direkt von der Molekülgröße ab und kann daher zu deren Berechnung dienen:

Berechnung des Polymerisationsgrads DP aus der Grenzviskositätszahl $[\eta]$ nach der Gleichung von Staudinger - Mark - Houwink:

$$[\eta] = K_P DP^a$$

für Cellulose/EWNN bei 20°C werden die Konstanten:

$$K_P = 2,78 \text{ und}$$

$$a = 0,758 \text{ verwendet.}$$

Der DP ergibt sich dann nach folgender Gleichung:

$$\log DP = 1,32 \log [\eta] - 0,586.$$

22.8.4.2 Messung der Lösungsviskosität

Die Viskosität einer Lösung wird in der Regel in einem Auslauf-Kapillar-Viskosimeter (Abbildung 22- 7) gemessen. Dabei lässt man ein festgelegtes Lösungsvolumen durch eine feine Kapillare auslaufen und misst die dazu erforderliche Zeit. Diese ist der Lösungsviskosität proportional. Die treibende Kraft ist dabei der hydrostatische Druck, die Scherrate wird durch die sich einstellende Auslaufgeschwindigkeit bestimmt.

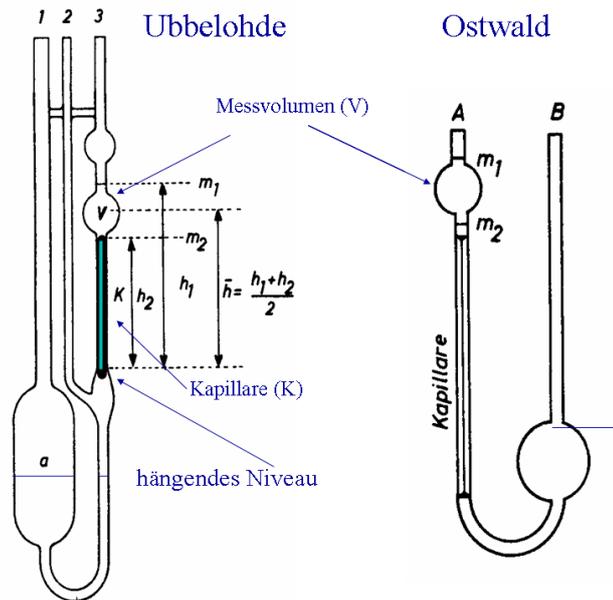


Abbildung 22- 7: Kapillarviskosimeter

22.8.5 GPC– SEC (Gelpermeations- bzw. Größenausschluss-Chromatographie)

Die Gelpermeations-Chromatographie (GPC) liefert die Molmassenverteilung. Man bedient sich hierzu einer Messanordnung, wie sie in Abbildung 22- 8 dargestellt ist.

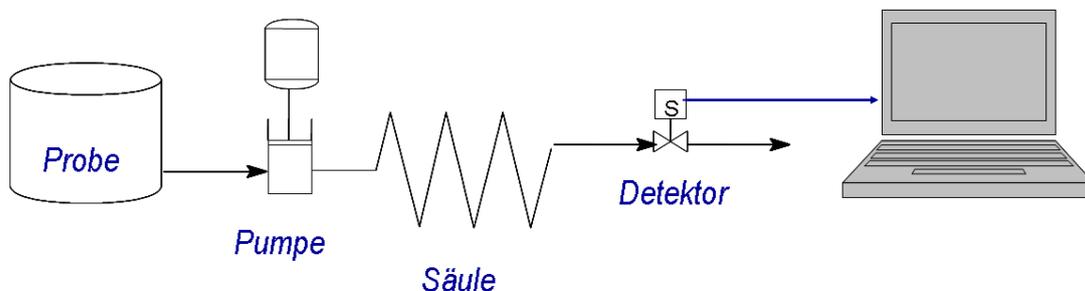


Abbildung 22- 8: Chromatographie-Apparatur

Die Probe, die eigentlich ein Substanzgemisch darstellt, wird in Lösung gebracht. Diese Lösung leitet man durch „Säulen“, die mit „Gelen“ locker gefüllt sind. Als Gel verwendet man z.B. Sephadex, ein vernetztes im Wasser viele Poren enthaltendes Polysaccharid, wobei die Porengröße über den Vernetzungsgrad eingestellt werden kann.

Beim Durchströmen der Säule erfolgt eine Auftrennung eines Substanzgemisches nach Molmassen. Die kleineren Moleküle können weiter in die Gelphase eindringen, werden

länger festgehalten und erscheinen später am Säulenausgang als die großen. Diese Vorgänge werden schematisch in Abbildung 22- 9 veranschaulicht.

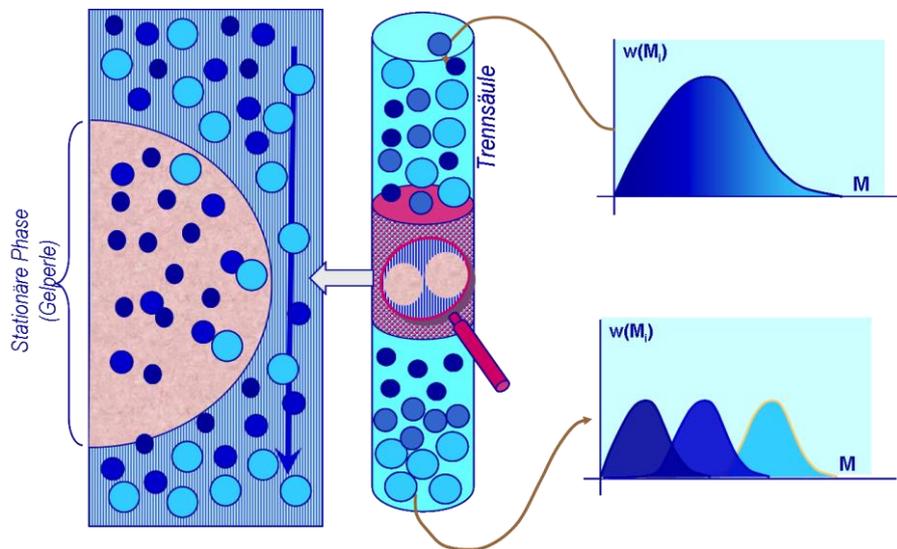


Abbildung 22- 9: Wirkungsprinzip der GPC

Die Verweilzeit in der Säule hängt von der Molekülgröße ab. Durch Eichung mit Molekülen bekannter Größe kann man die Beziehung von Verweilzeit und Molmasse empirisch ermitteln.

22.9 Strömungspotenzial Messung

Eine sehr wichtige Eigenschaft eines Faserstoffs für den Papieringenieur ist die Oberflächenladung. Diese kann über eine Titration mit Polyelektrolyten bestimmt werden. Bei einem anionischen Faserstoff (der übliche Fall) wird eine Lösung eines kationischen Polyelektrolyten zur Stoffsuspension zudosiert, bis keine Oberflächen Ladung mehr feststellbar ist.

Zwischen der anionischen Oberfläche und dem kationischen Polymer bildet sich ein ungeladener, unlöslicher Polymer-Komplex (Simplex). Dies geschieht auch sonst zwischen ungleich geladenen Polyelektrolyten (Abbildung 22- 10).

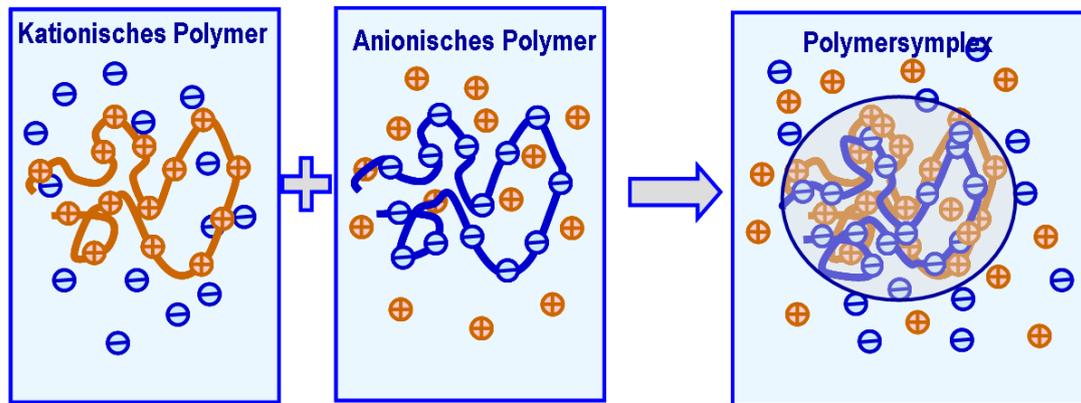


Abbildung 22- 10: Bildung eines Polymer-Simplex

Die Konzentration eines gelösten Polyelektrolyten kann man durch Messung des Strömungspotenzials bestimmen. Durch das Schergefälle in einer strömenden Lösung, deren positive und negative Teilchen sehr unterschiedlich groß sind, entsteht eine räumliche Trennung der geladenen Teilchen und dadurch eine elektrische Spannung in der Lösung (siehe Abbildung 22- 11), die an Elektroden gemessen werden kann.

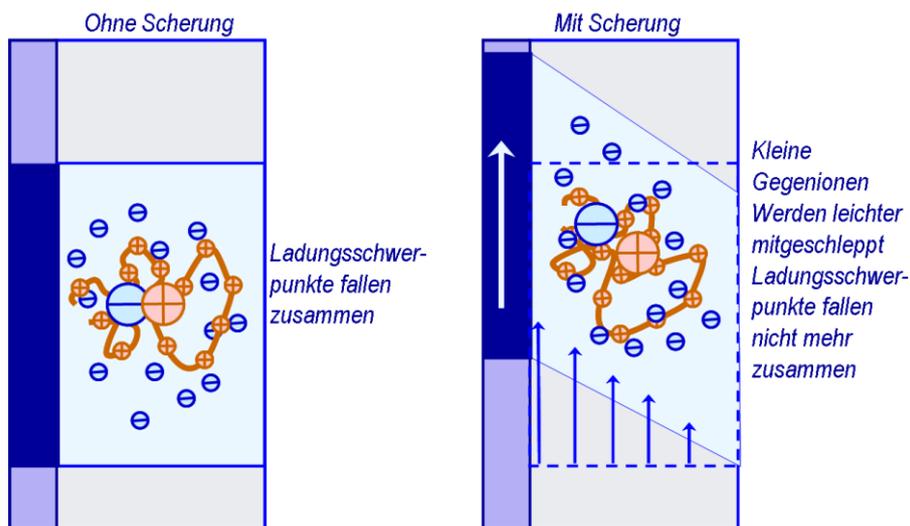


Abbildung 22- 11: Zur Entstehung des Strömungspotenzials in einer gescherten Polyelektrolyt-Lösung

In der Messzelle eines Strömungsstrom-Messgeräts (Abbildung 22- 12) fließt die Probenflüssigkeit durch die Bewegung eines Kolbens getrieben auf und ab (Wechselschichtung durch oszillierendes Heben und Senken des Kolbens). Durch die Ladungstrennung in der Lösung durch unterschiedliche Beweglichkeit der Polyelektrolyte und Gegenionen entsteht an den Elektroden eine Wechselspannung, die gemessen wird.

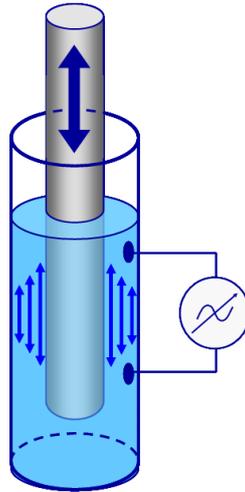


Abbildung 22- 12: Messzelle eines Strömungsstrom-Messgeräts (Streaming current detector)

Dieses Gerät kann man zur Bestimmung des Endpunkts einer Polyelektrolyt-Titration benutzen.

Man legt die Lösung der zu messenden Probe vor und misst das Strömungspotenzial. Dann dosiert man langsam schrittweise gegengeladenen Polyelektrolyten bekannter Konzentration zu, wobei das Potenzial durch die Bildung von ladungs-unwirksamen Polymer-Simplexen abnimmt (Abbildung 22- 13). Sobald das Potenzial Null erreicht ist, sind alle polymer-gebundenen Ladungen neutralisiert (Äquivalenzpunkt). Die Oberflächenladung des Faserstoffs entspricht dann der Menge an zudosiertem Polyelektrolyten.

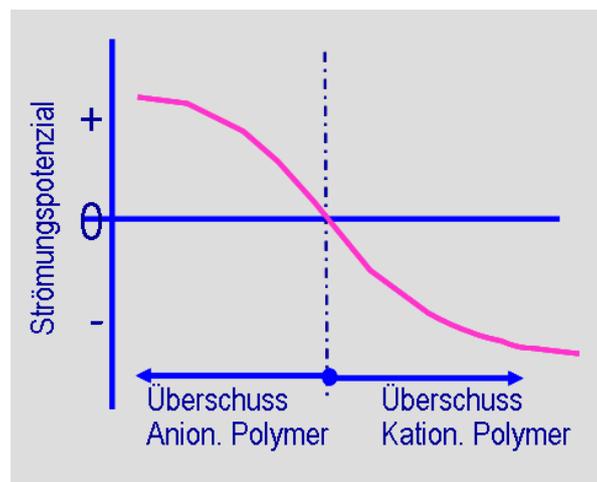


Abbildung 22- 13: Veränderung des Strömungspotenzials bei einer Polyelektrolyt-Titration

Bei einer Polyelektrolyttitration stellt sich der Endpunkt oft recht langsam ein, was zu Fehlern führen kann. Genauere Ergebnisse erhält man, wenn man zunächst einen Überschuss an gegengeladenem Polyelektrolyten zugibt und dann den Überschuss mit einem dazu komplementären löslichen Polyelektrolyten zurück titriert.