

HELMUT BANSA

Papierchemie: einige unentbehrliche Grundbegriffe

Die Bedeutung des Papiers

Es soll von einigen unentbehrlichen Grundbegriffen der Papierchemie die Rede sein, von Grundbegriffen, die man kennen und mit Inhalt erfüllen muß, wenn man die Literatur der Fachchemiker zu restaurierungskundlichen Fragen verstehen will. Das Loblied des Papiers braucht hier nicht gesungen zu werden: Papier ist heute und in die absehbare Zukunft hinein der wichtigste aller Datenträger; es ist durchaus nicht abzusehen, daß es eines Tages aus dieser Funktion verdrängt werden könnte. Denjenigen Datenträgern, die heute vorzüglich als Konkurrenz des Papiers, oder sagen wir besser, des Buches auftreten, den Mikroformen, ist das aus Papier bestehende Buch in der direkten Zugänglichkeit und der Benutzungsbequemlichkeit weit überlegen; gegenüber dem Buch sind die Mikroformen ein *faute de mieux*, erzwungen von Problemen der Lagerung und der Reproduktion. Die sogenannten AV-Medien (audiovisuelle Medien: Film, Tonband) bieten ihrer Natur nach andere Informationen als das aus Papier bestehende Buch; sie sind eine Ergänzung zum Buch. Und die EDV schließlich, deren Stärke in der Verarbeitung von Informationen liegt, in der schnellen Änderung, im Austausch, im Ergänzen, in der Kombination, hat zwar zur unmittelbaren, vorübergehenden Zugänglichkeit einen immateriellen Informationsträger, den Bildschirm; sie bringt aber die fertig verarbeitete Information, die für einige Zeit feststeht, den Output doch wieder auf Papier heraus, das, wenn die Information es verdient, zu einem Buch weiterverarbeitet werden kann und wird, oder auf dem ungeliebten Ersatz des Buches, auf Mikrofilm oder Mikrofiche.

Der konkurrenzlose Datenträger Papier ist im Mittelalter in diese seine Rolle hineingewachsen. Sein unmittelbarer Vorgänger in einer Zeit mit ganz ungleich geringer entwickelter Schriftlichkeit, das Pergament, ist ihm im Hinblick auf den Zweck als Datenträger weit unterlegen, nicht nur wegen der viel schwierigeren Beschaffbarkeit, und es ist interessant, sich einmal bewußt zu machen, daß diejenige Epoche der Vergangenheit, die in der zivilisatorischen Schriftlichkeit in etwa mit unserer Gegenwart verglichen werden kann, viel mehr jedenfalls als das Mittelalter, daß die Schriftlichkeit der antiken Mittelmeerwelt seit dem Zeitalter des Hellenismus auf einem Datenträger beruhte, der

mit Papier chemisch sehr eng verwandt ist: Papyrus besteht genauso überwiegend aus Cellulose wie Papier.

Die Bestandteile des Papiers *Cellulose*

Papier besteht überwiegend aus Cellulose, aber nicht ausschließlich. Papier ist eine vielfältige, komplizierte und manchmal geradezu geheimnisvolle Substanz. Es besteht aus organischen und aus mineralischen Bestandteilen, teils im Gemenge, teils in chemischer Verbindung. Fasern und Hilfsmittel (Leimung) oder auch die Bindemittel des Strichs stellen die organischen Bestandteile dar; sie sind das, was man am Papier fühlend und sehend wahrnimmt, sie machen seine Masse aus. Die anorganischen Bestandteile sind die Salze des zur Herstellung in großen Mengen benötigten Wassers, Rückstände von Hilfsstoffen im Herstellungsprozeß, Füllstoffe und Streichpigmente. Hier wird nur von den Fasern gesprochen, oder besser: von dem Stoff, aus dem die Fasern bestehen: von der Cellulose. Moderne Hadern, Linters sowie Kämmlinge von Baumwolle und Leinen, sind von der Natur gelieferte, fast reine Cellulose, Zellstoff ist die aus Holz isolierte Cellulose, und auch der Holzschliff besteht noch zu ca. 45 % aus Cellulose. Ebensovienig wie abzusehen ist, daß je der Datenträger Papier durch etwas anderes ersetzt werden könnte, ebenso wenig ist abzusehen, daß ein anderer Stoff die Cellulose als Substanz des Papiers ersetzen könnte. In den sechziger und frühen siebziger Jahren klang in der Fachliteratur bisweilen eine Euphorie an, daß die künstlichen Polymere die Papierindustrie erobern und sie revolutionieren werden. Damit ist es heute vorbei. Im Gegenteil: heute sind die Cellulosechemiker die Utopisten und sprechen davon, daß die Lösung des in der nächsten und übernächsten Generation immer dringender werdenden Problems des Mangels an organischem Rohstoff und Energieträger von der Cellulose kommen könne. Auch zu der Zeit des billigen Erdöls hatten die Hersteller von Kunstfasern Mühe, ihre Produkte den Papiermachern schmackhaft zu machen. Das hatte teils wirtschaftliche Gründe. Es hatte aber auch einen wichtigen chemischen Grund: es gibt kein künstliches Polymer, das in einer mit der Cellulose vergleichbaren Weise in der Lage ist, intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen auszubilden. Die Cellulose besitzt diese Fähigkeit wie kein anderer makromolekularer Stoff. Die Eigenschaft der Cellulose, Wasserstoffbrücken auszubilden, macht sich bemerkbar bei einer ganzen Reihe von technisch-physikalischen Eigenschaften, denen entscheidende Bedeutung gerade bei der Papierherstellung zukommt.

Die Bedeutung der Cellulose

Cellulose ist ein *Kohlehydrat*, das heißt, es besteht aus Kohlenstoff und Hydor; hydor ist griechisch und heißt „Wasser“. In den Kohlehydraten bildet der Kohlenstoff gleichsam das Skelett des Moleküls; um dieses Skelett ordnen sich die Bestandteile des Wassers, nämlich Wasserstoff (H) und *Hydroxylgruppen* (OH). Das Kohlenstoffskelett kann in den Kohlehydraten kettenförmig sein; die Kette kann durch andere Atome (O = Sauerstoff, N = Stickstoff) unterbrochen werden. Solch abweichende Stellen C—C—O—C oder C—C—N—C sind einem chemischen Angriff, der zum Kettenabbruch führt, stärker ausgesetzt als die reine Kohlenstoffkette C—C—C—C. Die Kette kann sich zu einem Ring schließen und sie kann Seitenketten ausbilden. Gleichartig aufgebaute Einheiten – Ringe, Konfigurationen mit abweichenden Stellen und/oder Seitenketten – können zu langen Reihen zusammengeschlossen sein und ein *Makromolekül* (= Großmolekül) bilden. Die Grundeinheit nennt man das *Monomere* (= das Ein-Teil), die Vielheit das *Polymere* (= Viel-Teil). Ist die Zahl der Einheiten nicht allzu groß, etwa zwischen 2 und 30, spricht man von Oligomeren (= Wenig-Teil). Mono- oder oligomere Kohlehydrate (Zucker) und polymere (Stärke, Cellulose) werden jährlich in Billionen von Tonnen von den grünen Pflanzen auf der Erde aus Wasser und aus dem Kohlendioxid der Luft aufgebaut. Gewaltige Mengen von Sonnenenergie werden so gebunden und von allen Lebewesen für ihre Ernährung, vom Menschen auch für seine Industrie ge- und verbraucht. Cellulose ist das vielseitigste und wichtigste Kohlehydrat. Sie ist die weitaus häufigste organische Substanz auf der Erde.

Bevor wir uns dem Aufbau der Cellulose zuwenden, ein kurzes Wort zu ihrem Abbau. Daß Cellulose, die alle Jahre in solch ungeheuren Massen nachwächst, auch rasch und progressiv wieder zerstört wird, daß sie sich selbst rasch und progressiv abbaut, ist eine Naturnotwendigkeit. Nur im Magazin von Archiv und Bibliothek ist diese naturnotwendige Fähigkeit der Cellulose zur Selbstzerstörung nicht erwünscht; man muß Vorkehrungen dagegen treffen.

Aufbau der Cellulose

Das Monomere der Cellulose ist die Glucose. Glucose ist Traubenzucker. Den Grundbaustein der Cellulose nennt man Glucoserest. Gl.-Rest deshalb, weil der Grundbaustein der Cellulose in der Summenformel (C₆H₁₀O₅) identisch ist mit dem um die Elemente des Wassers (H₂O) verminderten Glucosemolekül C₆H₁₂O₆). Es ist leicht vorstellbar: wenn in den Grundbaustein der Cellulose ein Wassermolekül eingebaut wird, entsteht Traubenzucker, ein

Stoff, der mit Cellulose in seinen physikalischen und mechanischen Eigenschaften überhaupt keine Ähnlichkeit hat. In der Tat ist die *Hydrolyse*, der Abbau (lyein = lösen) unter Beteiligung von Wasser, ein wichtiger Vorgang beim Abbau der Cellulose durch „Altern“ und durch die Enzyme der Schimmelpilze.

Von der Struktur des Monomeren der Cellulose macht man sich eine bestimmte schematische Vorstellung. Abbildung 1 gibt zwei verschiedene Modelle wieder, die sich beide von der – optisch unbeobachtbaren – Wirklichkeit schon allein dadurch unterscheiden, daß sie nicht oder nicht im vollen Umfang die 3. Dimension berücksichtigen; in Wirklichkeit hat das Cellulosemolekül natürlich einen räumlichen Aufbau. Weil die Stellung der Unregelmäßigkeit C—C—O—C und die Stellung der Seitenkette CH₂OH von Bedeutung ist, spricht man nicht den Glucoserest, sondern zwei solche entsprechend miteinander verknüpfte Reste als den Baustein des Cellulosemoleküls an. Man bezeichnet zwei solche miteinander verknüpfte Glucosereste als Cellobiose. Viele Hunderte oder Tausende von Grundbausteinen, kettenartig miteinander verknüpft, bilden das Makromolekül. Die Anzahl der Monomeren in einem Makromolekül nennt man den *Polymerisationsgrad*, abgekürzt DP für degree of polymerisation. Baumwolle, wie die Natur sie liefert, hat einen DP von etwa 15000; Linters, die soweit chemisch behandelt wurde, daß sie zu Papier verarbeitet werden kann – sie muß zum Beispiel gebleicht = entfettet werden –, hat einen DP von ca. 1500. Holzzellstoff: je nach Holzqualität und Herstellungsmethode 500 bis 2000. Bei einem Polymerisationsgrad unter 200 verliert die aus den Makromolekülen aufgebaute Cellulosefaser entscheidend an Festigkeit.

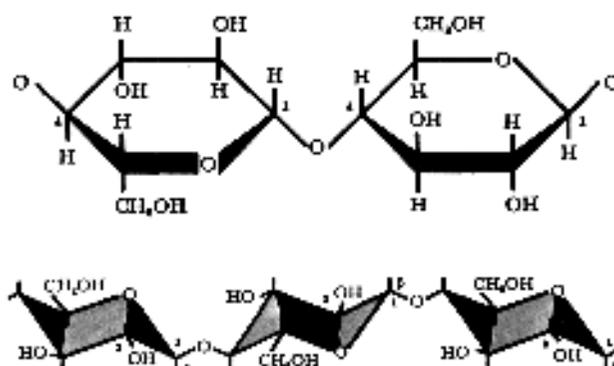


Abbildung 1: Schematische Darstellungen des Cellulose-Moleküls (2 bzw. 3 Monomere).

Die C-Atome an den (und Vierfachkreuzungsstellen eines Monomeren sind nicht ausgeschrieben.

Polymerisationsgrad und Viskosität

Man kann den DP eines Makromoleküls natürlich nicht auszählen. Man errechnet seine durchschnittliche Zahl in einem Stoff über die *Viskosität*, d.h. seine „Klebrigkeit“ (viscosus = klebrig), seine „Zähigkeit“. Um die Viskosität eines festen Stoffes wie die Cellulose zu messen, muß man ihn auflösen.

Auch Cellulose, in Wasser und in den üblichen Lösungsmitteln unlöslich, läßt sich in speziellen, für den Stoff nicht ungefährlichen und deshalb nur unter besonderen Vorkehrungen zu handhabenden Lösungsmitteln lösen. Die Lösung der gleichen Menge Feststoff in der gleichen Menge Lösungsmittel ist um so zäher = viskoser, je größer die Makromoleküle sind, aus denen der Feststoff besteht. Das ist leicht vorstellbar: große Moleküle bieten, wenn sie sich im Lösungsmittel bewegen, diesem gegenüber eine größere Reibungsfläche und bewegen sich deshalb schwerfälliger und langsamer als kleine. Man läßt eine bestimmte Menge Lösung durch eine Kapillare (= enge Röhre) laufen und mißt die Durchlaufzeit. Nach einer bestimmten Formel, die die Eigentümlichkeit der Kapillare (Länge, Durchmesser), der Lösung (Volumen, Konzentration) und des Lösungsmittels (Eigenviskosität) berücksichtigt, errechnet man aus dieser Durchlaufzeit die *Grenzviskositätszahl*. Ihre Bezeichnung ist der griechische Buchstabe $[\eta]$ = Eta in eckigen Klammern. Ihre Dimension ist Kraft, die nötig ist, um eine Schicht der Celluloselösung bestimmten Ausmaßes gegen die übrige Lösung mit bestimmter Geschwindigkeit zu bewegen. Zur Erklärung des Wortes Grenz-V.: es interessiert wirklich nur die Kraft, die zur Überwindung des Reibungswiderstandes bei der Bewegung der Makromoleküle gegen das Lösungsmittel nötig ist; der zusätzliche Widerstand, den die Makromoleküle, wenn zu viele in der Lösung sind, durch gegenseitige Behinderung leisten, soll eliminiert werden. Man „verdünnt“ deshalb auf mathematischem Wege die Lösung so weit es irgend geht, bis hin zum „Grenzwert“ der Konzentration Null. Nach einer allgemeingültigen physikalischen Formel, die die Gesetzmäßigkeit der Bewegung kleinster Teilchen (Moleküle) in Abhängigkeit von ihrer Größe ausdrückt – sie geht auf Einstein zurück – kann man aus der Grenzviskositätszahl die Molekülgröße, d.h. den Polymerisationsgrad errechnen.

Wasserstoffbrücken

Das aus mehreren hundert oder tausend Glucoseresen gebildete Cellulosemolekül ist nicht langgestreckt, sondern vielfach gefaltet. Einzelne Teile der Kette liegen dicht gepackt und regelmäßig nebeneinander; man nennt sie den

kristallinen Bereich des Makromoleküls. Er ist für die Festigkeit der Fibrillen verantwortlich: ein vollständig kristalliner Stoff wäre fest, hart und spröde wie Glas oder Metall. In der Cellulose umfaßt jeder kristalline Bereich etwa 222 Monomere. Zwischen den kristallinen Bereichen eines Cellulosemoleküls liegen amorphe Bereiche, d.h. solche ohne Regelmäßigkeit und Ordnung (siehe Abbildung 2). Sie bewirken die Elastizität und Flexibilität der Fibrillen und schließlich auch der aus ihnen bestehenden Fasern, Fäden, Filze und Gewebe.



Abbildung 2: Kristallite und amorphe Bereiche der Makromoleküle

Diese Fähigkeit, partiell festgefügte Bündel auszubilden, beruht auf einer der Cellulose in einzigartiger Weise eigentümlichen Eigenschaft, auf der Eigenschaft, *Wasserstoffbrückenbindungen* auszubilden. Was ist eine Wasserstoffbrücke? Wörtlich eine Verbindung, die über ein Wasserstoffatom geht. Es

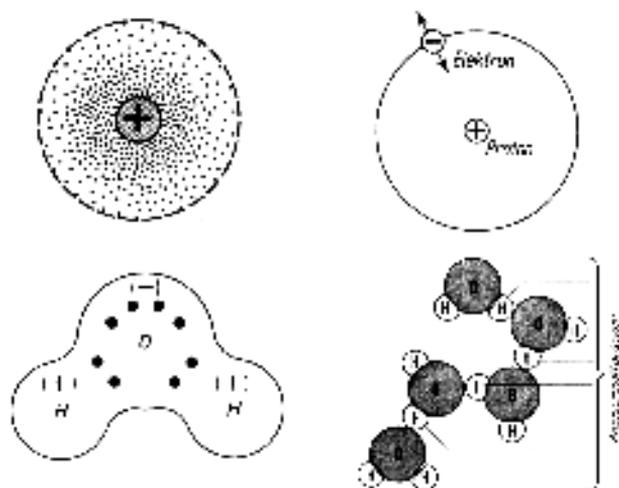


Abbildung 3: Polarität und Wasserstoffbrücken

links oben: Atom aus positiv geladenem Kern und Elektronenhülle

rechts oben: Wasserstoffatom

links unten: polares Wassermolekül

rechts unten: Wassermoleküle durch Wasserstoffbrücken verbunden

handelt sich um eine Verbindung zwischen den Molekülen oder Molekülteilen. Sie ist nicht so fest wie eine chemische Bindung zwischen Atomen und Ionen. Eine chemische Bindung gibt den Ausgangeinheiten – der Summe der Atome oder Ionen – so völlig andere Eigenschaften, daß man von anderen Stoffen spricht. Die Wasserstoffbrückenbindung verändert den Stoff – die Summe der Moleküle – zwar bei weitem nicht so stark wie die chemische Bindung; sie ist aber immerhin fest und einflußreich genug, um für die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Stoffes primär verantwortlich zu sein. Um sie zu begreifen, müssen wir etwas weiter ausholen (Abbildung 3).

Polarität

Der Aufbau eines Atoms aus positiv geladenem Kern und negativ geladener Hülle ist allgemein bekannt. Die Ladungsträger des Kerns sind die Protonen, die der Hülle sind die um den Kern kreisenden Elektronen. Jedes Atom hat ebenso viele Protonen wie Elektronen und zeigt sich deshalb nach außen als ausgeglichene, neutrale Einheit. Nun gibt es aber bestimmte Ideale für die Zahl der Elektronen, ganz unabhängig von der Ladungszahl des Kerns: 2, 10, 18 usw. Ein Atom versucht, diese ideale Elektronenzahl zu erreichen, indem es entweder diejenigen seiner Elektronen, die über einer Idealzahl liegen, abgibt, oder indem es sich die zu einer Idealzahl fehlenden Elektronen einfängt. Solche eingefangenen Elektronen sind aber nicht frei; sie gehören zu einem anderen Atom, dessen positiv geladener Kern das einfangende Atom notgedrungen mit in Kauf nehmen und in seiner Nähe – möglichst weit weg, denn die beiden positiv geladenen Kerne stoßen sich gegenseitig ab – dulden muß. Die eingefangenen Elektronen gehören sozusagen zu beiden Kernen; sie kreisen um beide und halten sich dabei bald in der Nähe des einen, bald in der Nähe des anderen auf. Sind es zwei sehr ungleiche Atome, die einen derartigen „Leihvertrag“ über den gemeinsamen Besitz von Elektronen eingehen, so kann es zu Unregelmäßigkeiten kommen. Das Wasserstoffatom ist das kleinste und schwächste, das es gibt; es hat nur ein Proton und nur ein Elektron. Sein Elektron wird deshalb von anderen Atomen, von solchen, denen Elektronen zur Idealzahl fehlen, z. B. von Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff, besonders gern eingefangen. Der einfach geladene Kern des Wasserstoffatoms ist nicht in der Lage, sein Elektron immer in seiner Nähe zu halten; das größere, stärkere, einfangende Atom, z. B. der Sauerstoff, hält dieses Elektron näher und öfter bei seinem Kern. Bei der Gruppe O—H macht sich also an der H-Seite, wo sich das gemeinsam besessene, zum Ladungsausgleich gegenüber dem H-Kern notwendige Elektron seltener aufhält, die positive Kernladung bemerkbar. An der O-Seite der Gruppe O—H,

wo sich das gemeinsam besessene Elektron häufiger aufhält als es zum Ladungsausgleich gegenüber dem O-Kern nötig wäre, wirkt die negative Ladung des Elektrons. Eine Hydroxylgruppe OH oder auch ein Wassermolekül H_2O ist also an der einen Seite positiv, an der anderen Seite negativ geladen. Es ist polar. Gegensätzliche Ladungen ziehen sich an: zwischen OH^+ und $-\text{OH}$ entsteht, über das Wasserstoffatom, eine Bindung, und dies ist die Wasserstoffbrückenbindung. Sie wirkt übrigens in der Cellulose nicht nur von Molekül zu Molekül bzw. zwischen den Molekülteilen, sondern auch an der Faseroberfläche zur Nachbarfaser. Die Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen bewirkt überhaupt erst die Verfilzung der Fasern, d. h. die Tatsache, daß man aus Cellulose Papier herstellen kann.

Hydroxylgruppen

Das Monomere der Cellulose hat drei Hydroxylgruppen, drei Stellen, an denen sich Wasserstoffbrücken ausbilden können. Diese drei Hydroxylgruppen sind es, die für die physikalischen und mechanischen oder technischen Eigenschaften der Cellulose verantwortlich sind. Verändert man auf chemischem Wege Hydroxylgruppen, so verändert man auch die Eigenschaften der Cellulose, und zwar so sehr, daß sie mit denen der unveränderten Cellulose kaum noch Ähnlichkeit haben. Cellulose mit OCH_3 statt OH an einem Teil der entsprechenden Stellen: Methylcellulose, ein kleisterähnlicher, wasserlöslicher, filmbildender Stoff; Cellulose mit CH_3COO statt OH an einem Teil der entsprechenden Stellen: Celluloseacetat, ein transparenter, lösungsmittellöslicher, thermoplastischer Kunststoff. Die Hydroxylgruppen der Cellulose sind es auch, an denen einige der Vorgänge stattfinden, die in ihrer Summe und gegenseitigen Wirkung das ausmachen, was man als „Alterung“ zusammenfaßt.

Alterung, Oxidation

An den Hydroxylgruppen oder genauer an der Atomfiguration $\text{H}-\text{C}-\text{OH}$ wirkt die Oxidation, und zwar der Fall der *Oxidation*, den die Chemiker als Dehydrierung (= Entzug eines Wasserstoffatoms) bezeichnen. Die Wasserstoffbrücke bricht dadurch zusammen. Es entsteht die Gruppierung $\text{H}-\text{C}=\text{O}$ mit Doppelbindung, d. h. eine Aldehydgruppe. Aldehydgruppen sind sehr reaktionsfähig; verantwortlich für diese Eigenschaft ist die Gruppierung $\text{C}=\text{O}$ mit Doppelbindung. Sie heißt *Carbonylgruppe*. Dies ist wieder ein Begriff, den der Restaurator in der Literatur liest, die der Chemiker für ihn schreibt, und den

er deshalb kennen muß. Aldehydgruppen, Carbonylgruppen sind wie gesagt sehr reaktionsfähig; sie können z. B. leicht weiter oxidiert werden. An ihnen wirkt eine andere Form der Oxidation, nämlich die Verbindung mit Sauerstoff. Aus $\text{H}-\text{C}=\text{O}$ wird $\text{H}-\text{O}-\text{C}=\text{O}$, in anderer Schreibweise COOH , d. h. eine *Carboxylgruppe*. Das H-Atom der Carboxylgruppe ist in der Regel nicht in der Lage, eine Wasserstoffbrücke zu bilden; es ist so locker mit den übrigen Atomen COO verbunden, daß es sich abspaltet, wenn Wasser vorhanden ist. Die Carboxylgruppe dissoziiert zu COO^- und H^+ ; die Carboxylgruppe ist eine Säure; die Carboxylgruppe ist das Charakteristische an den meisten organischen Säuren.

Hydrolyse

Wir sprechen vom Abbau der Cellulose, bisher vom Abbau durch Oxidation. Wenn der Restaurator im Zusammenhang mit Celluloseabbau das Wort „Säure“ hört, fällt ihm sofort ein anderer der Vorgänge ein, die in ihrer Summe und gegenseitigen Wirkung das Altern der Cellulose ausmachen: die Hydrolyse. Häufig, aber durchaus unkorrekt auch: der Säurefraß. Hydrolyse heißt, wie schon gesagt, Auflösung unter Beteiligung von Wasser. Die Hydrolyse der Cellulose wird gefördert durch Säure. Die Säure wird dabei nicht verbraucht; sie muß nur vorhanden sein, oder besser: sie bildet sich immer wieder zurück. Es wurde oben schon gesagt, daß in die Cellulose, in ihre Monomere, nur die Bestandteile des Wassers eingebaut werden müssen, chemisch ausgedrückt: daß die Cellulose einer Hydrolyse unterworfen werden muß, um aus ihr Traubenzucker zu machen. Die Hydrolyse setzt an den Unregelmäßigkeiten des Kohlenstoffskeletts $\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ und an den Übergangsstellen $\text{RC}-\text{O}-\text{CR}$ (R für „Rest“) zwischen den Monomeren an. Sie führt zu Ringaufspaltung und zu Kettenabbruch. Sie wird gefördert von Säure, ohne daß die Säure sich dabei verbraucht. Die Erscheinung, daß für den Ablauf einer chemischen Reaktion ein Stoff vorhanden sein muß, ohne dabei verbraucht zu werden, ohne sich in Art und Menge zu verändern, nennt man *Katalyse* (kata = hinab, entlang; Katalyse wörtlich = Auflösung). Die Hydrolyse der Cellulose wird durch Säure katalysiert.

Vernetzung

Bei der Oxidation von Cellulose entstehen in erster Linie – nicht ausschließlich – bestimmte reaktive Gruppen (Carbonyl-, Carboxyl-); bei der Hydrolyse

bricht in erster Linie der Ring oder das Makromolekül auseinander: der DP sinkt. Die bei der Oxidation entstehenden reaktiven Gruppen wirken in allerlei negativer Weise weiter; ein Beispiel wurde dargelegt, nämlich wie die Carboxylgruppen, das Ergebnis der zweistufigen Oxidation (Dehydrierung und Verbindung mit Sauerstoff) ihrerseits die Hydrolyse katalysieren. Von großer Bedeutung ist noch, daß die bei der Oxidation entstehenden reaktiven Gruppen in verschiedener, im einzelnen nicht näher bekannter Weise miteinander reagieren und neue Bindungen eingehen können, Bindungen von Molekül zu Molekül, von Molekülteil zu Molekülteil. Solche neuen Bindungen bilden sich im amorphen Bereich des Makromoleküls, der wie gesagt verantwortlich ist für die Flexibilität der Cellulose. Den Vorgang des Aufbaus solcher neuer Bindungen nennt man Vernetzung. Sie macht die Cellulose und die aus ihr bestehenden Fasern, Fäden, Filze und Gewebe unflexibel, hart und spröde. Kettenabbruch durch Hydrolyse und Vernetzung im Gefolge der Oxidation sind die wichtigsten Vorgänge, die das Altern der Cellulose und des Papiers ausmachen.

Kupferzahl, Kappazahl

Die Länge der Ketten, den Polymerisationsgrad, mißt man wie oben gesagt über die Viskosität. Von einer anderen, weniger aufwendigen, aber auch weniger aussagekräftigen Methode, um sich eine Vorstellung über die Größe der Cellulosemoleküle zu machen, wird noch die Rede sein. Zunächst aber ein paar Worte über die in der Cellulosechemie eingeführten Methoden, das Vorhandensein von reaktiven Gruppen, gebildet durch Oxidation, zahlenmäßig zu erfassen. Diese Gruppen sind, auch das wurde schon gesagt, sehr reaktionsfähig; sie wirken z. B. reduzierend. Der Cellulosechemiker gibt in quantitativ genau überwachter Reaktion ein Reagenz zu ihnen, d. h. zu einer Celluloseprobe, über deren Gehalt an reaktiven Gruppen er eine Vorstellung gewinnen will. Er wählt ein Reagenz aus, das im reduzierten Zustand auffällig anders gefärbt ist als im oxidierten. Die reaktiven, reduzierend wirkenden Gruppen der Cellulose reduzieren das Reagenz und verändern dadurch seine Farbe. Am Farbwechsel ist genau erkennbar, welche Menge des zugegebenen Reagenz' reduziert wurde, und aus ihr kann man auf die Menge der reaktiven, reduzierend wirkenden Gruppen schließen. Eine entsprechende, unter genormten Bedingungen durchzuführende Analyse mit dem Reagenz Kupfersulfat führt zur Kupferzahl, eine Analyse mit dem Reagenz Kaliumpermanganat führt zur Kappazahl: beides Aussagen über den Gehalt einer Celluloseprobe an reaktiven Gruppen.

Alkalilöslichkeit

Zum Schluß ein paar Worte zu einer Methode, die eine Vorstellung über die Größe der Cellulosemoleküle vermittelt, die in der Fachliteratur immer wieder vorkommt und mit der der Leser von Fachliteratur deshalb eine Vorstellung verbinden muß. Es geht um die Alkalilöslichkeit. Cellulose ist nicht nur, wie oben bei der Erklärung des Begriffes Viskosität zur Messung des Polymerisationsgrades gesagt, in speziellen Lösungsmitteln, sondern bis zu einem gewissen Grad auch in starken Alkalien löslich; zwar nicht die großen, langen Makromoleküle, aber die kürzeren. Der Prozentsatz an Bestandteilen einer Celluloseprobe, der sich in 17,5%iger Natronlauge löst, nennt man die Alkalilöslichkeit, den unlöslichen Anteil in Prozent der Ausgangsprobe die Alkaliresistenz. Für Alkaliresistenz findet man auch den Ausdruck *Alphacellulose*. *Betacellulose*: der Anteil in Prozent der Ausgangsmenge, der ausfällt, wenn man die 17,5%ige Natronlauge, in der die „Alkalilöslichkeit“ gelöst ist, mit Essigsäure neutralisiert. *Gammacellulose*: der Anteil, der auch nach dem Neutralisieren gelöst bleibt. Man erfaßt mit dieser Messung der Alkalilöslichkeit neben der kurzkettigen Cellulose recht verschiedenartige Stoffe aus der näheren chemischen Verwandtschaft der Cellulose mit recht verschiedener Molekülgröße und auch recht verschiedenem Molekülaufbau. Je nach Herkunft der alkalilöslichen Anteile spricht man von *Hemicellulose*: natürliche pflanzliche Polysaccharide (= Zuckerpolymere), die zusammen mit der Cellulose vorkommen; – von *Hydrocellulose*: durch Hydrolyse abgebaute Cellulose; – von *Oxycellulose*: durch Oxidation abgebaute Cellulose.

Hier soll der Versuch abgebrochen werden, den chemisch nicht oder nicht intensiv vorgebildeten Leser von restaurierungskundlicher Fachliteratur mit einigen Begriffen vertraut zu machen, die er zum Verständnis dieser Literatur braucht. 22 Begriffe wurden ausgewählt; sie sind durch Kursivdruck hervorgehoben. Ihre Auswahl ist so willkürlich wie ihre Erklärung nicht zureichend vom Standpunkt vollständiger und wissenschaftlich genauer Definition. Das Ziel des Autors war es, diesen unvermeidlichen Mangel wettzumachen durch eindringliche, durch handgreifliche didaktische Anschaulichkeit. Er kann es ohne Mitwirken des Lesers nicht erreichen, ohne Mitwirken des Lesers dadurch, daß er sich vom Ungewohnten, vom Neuen und Fremdartigen nicht entmutigen läßt, daß er den vorstehenden Text langsam, wenn es nötig ist, zwei- und drei- und mehrmals liest.