

HALTBARES PAPIER

Klaus B. Hendriks

EINLEITUNG

Papier ist der wohl immer noch wichtigste Datenträger. Die auf Papier geschriebenen oder gedruckten Informationen sind direkt, d. h. ohne die Hilfe von Maschinen lesbar. Da erscheint es einleuchtend, solche Papiere, die für die Anfertigung von langfristig zu erhaltenen Dokumenten destiniert sind - - wie z. B. Gesetzestexte, juristische Urkunden, Werke der Dichtung und Poesie, oder technische und wissenschaftliche Schriften - - haltbar herzustellen. Leider gehen nun die Ansichten darüber auseinander, was haltbares Papier ist. Wir werden sehen, daß diese Frage nicht ganz einfach zu beantworten ist, was zu einer Vielzahl von Antworten Anlaß gibt. Dennoch gibt es, in der Meinung des Verfassers, wirklich nur einen Ansatz, um eine einigermaßen befriedigende Antwort zu geben.

Um zu verstehen, welche Zusammensetzung haltbares Papier haben und wie es hergestellt werden muß, ist es notwendig, die Gründe zu verstehen, die zur Brüchigkeit und Versprödung vieler heutiger Papiere geführt haben. Erfahrung hat uns gelehrt, da die Mehrheit dieser Papiere während der letzten 130 bis 160 Jahre gemacht wurden.

EINE WICHTIGE BEOBACHTUNG: SÄUREHALTIGES PAPIER

Im Jahre 1882 veröffentlichte ein Prof. Feichtinger aus München die Ergebnisse seiner Versuche über das Vorkommen von Säure in verschiedenen Papiersorten mit Harzleimung, also zeitgenössischen Produkten (1). Die saure Reaktion rührte entweder von freier Schwefelsäure oder von einem sauer reagierenden schwefelsauren Salz her. Feichtinger folgerte richtig, daß die in Papieren nachgewiesene Säure Einfluß auf deren Haltbarkeit haben könnte.

Etwa zwanzig Jahre später bestätigte O. Winkler die Beobachtungen Feichtingers (2). Er bemerkt, daß in den 1886 veröffentlichten Vorschriften für Papierlieferungen zum amtlichen Gebrauch als eine der Hauptbedingungen gestellt ist, daß jedes Papier ohne freie Säure zu liefern sei, und kritisiert, daß diese Bedingung in einer fünf Jahre später herausgegebenen revidierten Fassung weggelassen sei. Seine Versuche wiesen ohne Zweifel freie Säure in mehreren Papieren nach; er zeigte ferner, daß freie Säure im Papier durchaus beständig ist und fast unmöglich aus ihm zu entfernen sei. In mit Säuren verschiedener Verdünnung getränkten Papierprüflingen konnte er eine Schwächung der Papierstruktur nachweisen; Schwefelsäure wirkt energischer auf Papier ein als Salzsäure; und durch die Einwirkung der Säure auf das Papier und Schwächung desselben wird die Säure nicht verbraucht, was mit unserer heutigen Auffassung der Säure als Katalysator gut übereinstimmt.

Seit der Zeit zieht sich die Überzeugung, daß säurehaltiges Papier nicht beständig ist, wie ein roter Faden durch die Literatur über seine Bestandserhaltung. Dabei

war schon vor mehr als hundert Jahren aus der reinen Chemie bekannt, daß Cellulose in wäßriger Lösung durch Säuren in kleinere Bausteine gespalten wird, eine Reaktion, die als Hydrolyse bezeichnet wird. Tausende von Artikeln sind über die Einwirkung von Säuren auf die Cellulose, die ja im Textilbereich, in der Pflanzenphysiologie und in der Papierindustrie eine überragende Rolle spielt, veröffentlicht worden. Ihre genaue Strukturauflösung gelang englischen Chemikern Ende der zwanziger Jahre dieses Jahrhunderts eben durch Abbau der Cellulose auf den Grundbaustein, das Disaccharid Cellobiose, mittels saurer Hydrolyse. Hunderte von Artikeln aus dem Gebiet der Papiertechnologie haben die schädliche Wirkung von Säuren auf die Haltbarkeit des Papiers bestätigt. Dies hat zu der etwas vereinfachten, von den Hütern der Papierbestände in kulturellen Sammlungen oft geäußerten Meinung geführt, daß alles saure Papier unerwünscht, da nicht haltbar, alkalisches Papier dagegen beständig sei. Wir werden sehen, daß diese Vereinfachung modifiziert werden muß: brüchig gewordenes Papier ist fast immer das Ergebnis einer durch Säure hervorgerufenen Hydrolyse seines Hauptbestandteils, der Cellulose; der Umkehrschluß trifft jedoch nicht zu, das nämlich jedes Papier, das sauer reagiert, auch unweigerlich dem Untergang geweiht ist.

WEITERE STUDIEN ÜBER DIE HALTBARKEIT DES PAPIERS

Systematische Studien über die Abhängigkeit der Haltbarkeit von der Stoffbeschaffenheit wurden um die Jahrhundertwende von W. Herzberg an der Materialprüfungsanstalt in Berlin-Dahlem durchgeführt (3). Durch Versuche an über 1000 Normalpapieren, die auf Festigkeit und Dehnung geprüft wurden und dann nach 12- bis 15jähriger Lagerung wiederum getestet wurden, ergaben, daß sich Hadernpapiere etwas besser verhielten als Zellstoffpapier oder Mischpapiere aus Hadern und Zellstoff. Im Jahre 1925 veröffentlichten zwei schwedische Autoren die Ergebnisse ähnlicher Versuche an Normalpapieren, die 10 bis 12 Jahre gelagert hatten (4). Sie zeigten ebenfalls die Überlegenheit der Hadernpapiere gegenüber den aus gebleichtem Sulfitzellstoff hergestellten Papieren. Derartige Untersuchungen gaben Anlaß zu detaillierten Normen für haltbares Papier, die nach mehreren Gebrauchsklassen aufgeschlüsselt waren, Vorschriften für die Stoffzusammensetzung enthielten, und noch bis nach dem 2. Weltkrieg gültig waren (5). Von Europa verlagerten sich diese Studien nach Übersee ans US National Bureau of Standards [NBS; heutiger Name: National Institute for Standards and Technology, NIST]. Die Forschungen am NBS, die in Zusammenarbeit mit zwei bedeutenden Papierherstellern in den USA durchgeführt wurden, führten zu dem Ergebnis, daß chemisch hergestellter Zellstoff, d. h. solcher, der aus Holz durch Abtrennen des Lignins mittels verschiedener Aufschlußverfahren ["Halbstoff"] und anschließendem Bleichen ["Ganzstoff"] gewonnen wird, eine reine Cellulose ergibt, die weniger als ein Prozent Lignin enthält. Seit der Zeit hat sich die Ansicht durchgesetzt, daß haltbares Papier nicht not-

wendigerweise aus Hadern, d. h. Fasern aus Leinen, Baumwolle und dgl., bestehen muß, sondern auch aus vollständig gebleichtem Zellstoff hergestellt werden kann. Das spiegelt sich in den gegenwärtigen Normen wider, die nicht mehr Hadern als Rohstoff für haltbare Papiere vorschreiben, sondern aus Holz gewonnene Ganzstoffe mit weniger als 1% Lignin verlangen. Die Diskussion zur Frage der Haltbarkeit von Papier, insbesondere diejenige von Hadernpapieren im Vergleich zu Papieren aus chemisch gewonnenem Zellstoff und neuerdings zu ligninhaltigen Papieren hält jedoch unvermindert an. Die Frage, ob haltbares Papier Lignin enthalten darf, und wenn ja, wieviel, ist besonders aktuell.

EIGENSCHAFTEN VON VOR 1800 HERGESTELLTEN PAPIEREN

Die bis jetzt erwähnten Arbeiten haben nur zeitgenössische Papiere untersucht, d. h. solche des späten 19. und des 20. Jahrhunderts. Die Eigenschaften von handgeschöpften Papieren, die zwischen 1400 und 1800 gemacht wurden, sind bis vor kurzem kaum erforscht worden. Das ist überraschend, haben doch die amtlichen Hüter unseres gedruckten und geschriebenen kulturellen Erbes diese Schätze griffbereit in ihrer Obhut, welche somit für Beobachtungen und Studien unmittelbar zugänglich sind. Da sie sich in ihrer ganz überragenden Mehrzahl in gutem Zustand befinden, stellen sie ausgezeichnete Studienobjekte zur Erforschung der Gründe ihrer Haltbarkeit dar. Einige Beobachtungen und Daten über diese Papiere sind in den letzten Jahren bekannt geworden (6, 7, 8). Ein Vergleich der Eigenschaften von vor 1800 hergestellten Papieren [etwa 200 Jahre alt] mit denen von Papieren, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts maschinell hergestellt wurden, läßt die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gut erkennen. Natürlich gealterte, handgeschöpfte Papiere haben eine Reihe von physikalischen und chemischen Eigenschaften bewahrt, die in derselben Größenordnung liegen, wie diejenigen von zeitgenössischen, lignin-freien Papieren. Sie werden nur noch von modernen handgeschöpften Papieren übertroffen. [Siehe Literaturstelle 8]. Zu den genannten Eigenschaften zählen pH-Wert, Falzfestigkeit, Bruchlänge, Dehnung, Reißarbeit, Nullpunktreißfestigkeit, und der Sprödigkeitsindex (9). Wir haben diese vor dem 19. Jahrhundert handgeschöpften Papiere, wegen ihrer deutlichen Unterschiede in ihren Eigenschaften im Vergleich zu denen von Maschinen hergestellten des 19. und 20. Jahrhunderts, als Typ I bezeichnet. Die letzteren werden als Papiere vom Typ II kategorisiert. Die mechanischen Festigkeitseigenschaften der etwa 200 Jahre alten Papiere vom Typ I zeigen an, daß sie entweder eine überragende Fähigkeit haben, ihre ursprünglichen Eigenschaften beizubehalten, oder daß dieselben schon zu Beginn ziemlich hoch angelegt waren. Papiere vom Typ I:

- sind vor dem Jahre 1800 handgeschöpft worden;
- enthalten aus Leinen, Baumwolle oder Hanf gewonnene Cellulosefasern;
- sind lignin-frei;
- sind in der Regel mit Gelatine oberflächengeleimt, jedoch niemals harzgeleimt;

- haben eine geringere Helligkeit, als Papiere vom Typ II, bewahren diese aber gut;
- sind sich in ihren Eigenschaften ziemlich ähnlich, da sie hauptsächlich zum Zweck des Schreibens und Druckens von Texten gemacht wurden. Auch unterscheiden sich die Verfahren zu seiner Herstellung in Papiermühlen nur wenig;
- wurden aus Rohstoffen geschöpft, die aus Leinen- und Baumwollresten [Hadern] durch einen mehrere Wochen dauernden Fäulnisprozeß bei Raumtemperatur, oder etwas darüber, gewonnen wurden. Dies könnte wohl der bedeutendste Faktor sein, der die Eigenschaften der Papiere vom Typ I bestimmt. Man vergleiche dieses milde Verfahren und seine vorteilhaften Auswirkungen mit den aggressiven Reaktionsbedingungen, unter denen chemische Zellstoffe hergestellt werden [alle Verfahren arbeiten bei über 100°C];
- wurden aus Rohstoffen geschöpft, die über mehrere Wochen lang mit Kalkwasser behandelt worden waren. Dies ermöglichte den Kalziumjonen in die Fasern zu wandern und saure Gruppen in der Cellulose in die entsprechende Salzform zu überführen;
- haben einen mittleren Polymerisationsgrad von 560 [gemessen an 16 Proben];
- zeigen schließlich eine ausgezeichnete Bewahrung ihrer Eigenschaften, was einen hohen Grad an Haltbarkeit bedeutet.

Nun gibt es aber sicherlich Millionen von Dokumenten aus Papier vom Typ I, die zwischen dem 14. und dem beginnenden 19. Jahrhundert gemacht wurden, und die in ausgezeichneter Verfassung auf uns gekommen sind. Diese Beobachtung rechtfertigt den Vorschlag, Papiere vom Typ I als Maßstab für die Haltbarkeit von Papier zu setzen. Mit anderen Worten, es ist klar, da Papiere so hergestellt werden können, da sie 500 Jahre in gutem Zustand überdauern. Papiere vom Typ I sind ein Lehrbeispiel für die gewünschten und erforderlichen Eigenschaften, die dieses Material haben muß um mehrere Jahrhunderte zu überleben. Es handelt sich nun darum, die Gründe für diese Haltbarkeit zu erforschen und die Ergebnisse auf die Papierfabrikation anzuwenden.

Handgeschöpfte Papiere haben ein besonderes Charakteristikum. Wie schon erwähnt, sind sie meist mit Gelatine oberflächengeleimt. Das gibt ihnen einen pH-Wert von rund 5,0, gemessen nach der Methode der Extraktion in kaltem Wasser. Sie scheinen damit der allgemein angenommenen Ansicht zu widersprechen, daß säurehaltige Papiere selbstverständlich unbeständig sind. Man sieht daraus aber, das es wichtig ist, die Ursache der sauren Reaktion zu kennen, um zu entscheiden, ob sie der Haltbarkeit des Papiers abträglich ist. Offenbar rührt die saure Reaktion handgeschöpfter Papiere von der Gelatine her. Weiterhin erscheint es, daß die Gegenwart derselben der Haltbarkeit des Papiers vom Typ I nicht nur nicht abträglich ist, sondern seine Erhaltung noch fördert (7). Ganz offenbar tragen die Säuregruppen der in Gelatine enthaltenen Aminosäuren nicht zur Hydrolyse der Cellulose bei. Bekannt ist dagegen die Wirkung der Gelatine als Sauerstoff-Barriere, was vielleicht zur Haltbarkeit der mit Gelatine geleimten Papiere beiträgt. Die mögliche Rolle der Gelatine als ein wichtiger zur Haltbarkeit beitragender Faktor,

ist noch nicht genügend untersucht worden. Bekannt ist ferner, daß Papiere, die sowohl dauerhaftig als auch haltbar sein müssen, wie z.B. Banknoten und ähnliche Wertpapiere, aus genau denselben Materialien gemacht werden wie Papiere vom Typ I, nämlich aus Baumwollfasern und mit Gelatine geleimt.

Wir halten fest, daß Papiere vom Typ I, die uns über Jahrhunderte hinweg in großer Zahl in kulturellen Sammlungen in all ihrer Pracht vorliegen, meist aus Leinen- oder Baumwolle bestehen, einen sauren pH-Wert haben, mit Gelatine geleimt sind, und kein Lignin enthalten. Sie stellen daher vorzügliche Studienobjekte dar, deren Verständnis unser Wissen über die Gründe der Haltbarkeit von Papier erweitern sollte.

WAS IST HALTBARES PAPIER?

Alle gegenwärtigen Normen, einschließlich diejenige der International Organisation for Standardisation [ISO], ISO 9706, schreiben vor, daß haltbares Papier aus vollständig gebleichtem, d.h. lignin-freiem [$< 1\%$], Zellstoff hergestellt, etwa 2% Kalziumkarbonat als Alkaliereserve enthalten, und einen pH-Wert von wenigstens 7,5 haben soll. [Was übrigens bedeutet, daß die handgeschöpften Papiere aus fünf Jahrhunderten nicht als haltbar im Sinne dieser Norm eingestuft werden können!]. Die gegenwärtige Methode, um das Verhalten von Papier bezüglich seiner Haltbarkeit zu bestimmen, besteht in der Anwendung von beschleunigter Alterung. Sie wird gewöhnlich bei nur einer Kombination von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit [R.L.], z.B. nach ISO bei 80°C und 65% R.L., durchgeführt. Gewisse Festigkeitseigenschaften werden vor, während, und nach Ende der beschleunigten Alterung gemessen, und die im allgemeinen abfallenden Werte gegenüber der Dauer der Alterung aufgetragen. Entscheidungen darüber, wie groß der Verlust an Festigkeit, in Prozenten ausgedrückt, sein darf um ein Papier als haltbar oder nicht haltbar einzustufen, sind willkürlich. Wie nämlich die Geschwindigkeit des Festigkeitsverlustes durch beschleunigte Alterung mit der Lebensdauer des Papiers in Beziehung steht, ist nicht ohne weiteres einzusehen. Wäre diese Methode zuverlässig, würde sie die die Zusammensetzung des Papiers betreffenden Vorschriften [was z.B. den Faserrohstoff, oder die Leimung angeht] überflüssig machen. Dies ist der gegenwärtige Trend: Normen zu schreiben, die nur noch auf der Messung von mechanischen Festigkeitswerten oder von chemischen Eigenschaften und deren Änderung als Folge beschleunigter Alterung beruhen. Das wäre tatsächlich ideal, wenn die Eigenschaft der Haltbarkeit leicht meßbar wäre. Das Gegenteil ist der Fall. Es gibt keine einfache Methode, um die Haltbarkeit eines Stoffes zu bestimmen. Man umgeht das, indem mehrere Festigkeitseigenschaften und ihre Beibehaltung nach verschiedenen Zeiträumen künstlicher Alterung gemessen werden. Das liefert einen Hinweis über die Fähigkeit des Papiers, seine Festigkeit zu erhalten. Dadurch wird allerdings keine Einsicht darüber gewonnen, ob das Papier nun in 100 oder 500 Jahren noch überlebt haben wird.

Nun läßt sich aber die beschleunigte Alterung bei verschiedenen Temperaturen durchführen, z.B. bei 80°C,

70°C, 60°C, 50°C, und 40°C, jedoch immer in derselben relativen Luftfeuchtigkeit. Aufgrund einer mathematischen Beziehung aus der chemischen Kinetik, die die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion in Abhängigkeit von der Temperatur ausdrückt, der Arrhenius-Gleichung, ist es möglich von den Reaktionsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Temperaturen auf diejenige bei normaler Zimmertemperatur zu extrapolieren. Die Gültigkeit dieser Methode muß natürlich durch genaue Versuche bewiesen werden, was aber bis jetzt noch nicht geschehen ist. Ein Blick in die umfangreiche Literatur zeigt, daß künstliche Alterung in der Regel bei nur einem Temperaturniveau, in Verbindung mit konstanter relativer Luftfeuchtigkeit, ausgeführt wird.

Selbst wenn es regelmäßige Praxis werden würde, beschleunigte Alterung nach der Arrhenius-Methode durchzuführen, müßten Genauigkeit und Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens untersucht werden. Das ist aber bisher nur für das Verhalten organischer Farbstoffe in Farbfotografien diskutiert worden (10). Der Autor dieser Arbeiten, C.C. Bard, hatte mit seinen Kollegen einen klassischen Aufsatz veröffentlicht, in dem er zeigte, daß das Verbleichen bei Zimmertemperatur eines Farbstoffs in Farbfotografien aufgrund von Messungen des Verbleichens an beschleunigt gealterten Prüflingen vorhergesagt werden kann (11). Die Alterung wurde bei sechs verschiedenen Temperaturen gemessen. C.C. Bard weist nun darauf hin, daß die Genauigkeit der Arrhenius-Prüfung durchaus gut ist, da das Verbleichen einer Farbfotografie gut mit den vorhergesagten Verbleichungsgeschwindigkeiten, die mit Hilfe der Arrhenius-Methode ermittelt wurden, übereinstimmt. Jedoch ist die Reproduzierbarkeit der Arrhenius-Methode weniger zuverlässig. Um die Ergebnisse zu verbessern, wäre eine sehr große Zahl von Tests über einen Zeitraum von mindestens fünf Jahren nötig. Je länger die vorhergesagten Zeiträume, die nötig sind, um eine Verbleichungsreaktion zu einem definierten Endpunkt zu bringen, umso größer werde die Streuung der Meßdaten. Derartige Überlegungen sind bis jetzt noch nicht für Papier angestellt worden, ein Stoffgemisch von viel uneinheitlicherer Zusammensetzung als ein Farbstoff.

Weiter oben wurde der mittlere Polymerisationsgrad [DP] von Cellulosen im Papier erwähnt. Er gibt die durchschnittliche Anzahl von Glukose-Einheiten an, die sich in einer Cellulose befinden. Als Maß der Kettenlänge eines Cellulosemoleküls ist er ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Cellulosen aus Baumwolle, Leinen oder Flachs haben einen DP von 2000 bis 3000, chemisch gewonnene Zellstoffe von 800 bis 1000, manchmal bis zu 1500. Wichtig ist der Zusammenhang zwischen DP und den Festigkeitseigenschaften der Cellulosefaser. So nimmt die Festigkeit im Bereich 3000 bis 900 in der Regel nicht ab. Beim weiteren Absinken von etwa 800 auf 2 - 300 DP verringert sich auch die Festigkeit der Fasern erheblich, und zwar proportional zur Abnahme des Polymerisationsgrades. Deshalb ist eine Cellulose umso altersbeständiger, je höher ihr Polymerisationsgrad liegt. Denn Cellulosen vom Polymerisationsgrad 2000 bis 3000 werden weit längere Zeit benötigen bis sie so weit abgebaut sind, daß die Festigkeitseigenschaften wesentlich abnehmen,

als Cellulose vom Polymerisationsgrad 800 bis 1200 (12).

Schließlich ist zu überlegen, ob Institute, Organisationen und Regierungen, die ein berechtigtes Interesse an Papieren von hoher Haltbarkeit haben, nicht als haltbares Papier ein solches definieren, das eine Lebenserwartung von 500 Jahren hat. Daß das ohne weiteres möglich ist, wird ja durch den ausgezeichneten Zustand der Papiere vom Typ I gezeigt. Solche Papiere können natürlich maschinengefertigt sein, aber sie müßten wohl einen hohen DP, keine Harzleimung, auf schonende Weise bereitete Fasern, und nach neueren Erkenntnissen auch noch eine zweiprozentige Reserve von Kalziumkarbonat aufweisen.

SCHLUBBEMERKUNG

Man kann die Geschichte der Papierherstellung in der westlichen Welt in drei Phasen einteilen:

1. Vom 14. Jahrhundert bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Papier wurde aus Hadern hergestellt, d.h. ihre Fasern stammen von Leinen, Baumwolle oder Hanf. Sie wurden vornehmlich mit Gelatine, gelegentlich auch mit Stärke, oberflächengeleimt. Diese Papiere sind uns in guter Verfassung erhalten geblieben.
2. Von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis in die 1930iger Jahre. Während dieser Zeit konnte gezeigt werden, daß Rohstoffe für die Papierherstellung aus Holz gewonnen werden konnten. Harzleimung war die bevorzugte Art der Leimung. Viele dieser Papiersorten enthalten Lignin. Die Fasergewinnung erforderte aggressive Aufschlußverfahren bei hohen Temperaturen, als deren Folge viele Papiere freie Säure entwickelten.
3. Von den 1930iger Jahren bis zur Gegenwart. In dieser Phase wurde vom US National Bureau of Standards, in Zusammenarbeit mit der Papierindustrie, versucht zu zeigen, daß haltbare Papiere aus Rohstoffen hergestellt werden konnten, die aus Holz gewonnen wurden. Der so erhaltene Zellstoff ist frei von Lignin. Ohne die schädliche Harzleimung, und in Gegenwart von Kalziumkarbonat, werden diese ligninfreien Papiere heute als haltbar angesehen.

So befinden wir uns jetzt in einer Phase, in der die Papierindustrie versucht zu demonstrieren, daß einige ligninhaltige Zellstoffe zur Herstellung haltbarer Papiere herangezogen werden können. Natürlich gibt es keine wirkliche Erfahrung hinsichtlich der Lebenserwartung dieser Papiere, da sie zu den allerneuesten Erzeugnissen der Industrie gehören.

Es wird daher vorgeschlagen, diejenigen Papiere, die ihre Haltbarkeit über Jahrhunderte hinweg klar bewiesen haben, als Muster zu betrachten, sowohl für das Studium der immer noch etwas rätselhaften Eigenschaft, die wir *Haltbarkeit* [Engl: permanence] nennen, als auch als angestrebtes Ziel, das ein haltbares Papier erreichen sollte: nämlich eine Lebenserwartung von rund 500 Jahren.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Prof. Feichtinger. "Über die Ursache der sauren Reaktion mancher Papiersorten." *Dinglers Politechnisches Journal*. **1882**. No.245, S.174-177.
2. O. Winkler. "Verhalten der Mineralsäuren im Papier und ihre Wirkung auf die Faserstoffe." *Zeitschrift für angewandte Chemie*. **1903**. Heft 2, S. 25-27.
3. W. Herzberg. *Mitteilungen des Material-Prüfungsamtes Berlin Dahlem*. **1907**. S.82. **1911**. S. 169.
4. S. Köhler und G. Hall. *Svensk Papper Tidning*. **1925**. Nr. 10, S. 240.
5. Die letzte dieser Normen war DIN 827.
6. T. Barrett. "Early European Papers/ Contemporary Conservation Papers." *The Paper Conservator*. **1992**. No. 13, 108 S.
7. T. Barrett und J. Waterhouse. "The Aging Characteristics of European Handmade Papers 1400-1800." *Tappi Journal*. **1992** (October) S. 207-212.
8. K. B. Hendriks. "Permanence of Paper in Light of Six Centuries of Papermaking in Europe." In: *Environnement et Conservation de l'Ecrit, de l'Image et du Son*. Actes des Deuxiemes Journees Internationales d'Etudes de l'ARSAG. Paris, 16 au 20 mai **1994**. S. 131-137.
9. X. Zou, N. Gurnagul, T. Uesaka und J. Bouchard. "Accelerated Aging of Papers of Pure Cellulose: Mechanism of Cellulose Degradation and Paper Embrittlement." *Polymer Degradation and Stability*. **1994**. Vol. 43, S.393-402.
10. C.C. Bard. "Image Stability in Perspective." Paper presented at the meeting of the Society of Photographic Scientists and Engineers, Las Vegas **1986**, February 4.
11. C.C. Bard, G.W. Larson, H. Hammond, und C. Packard. "Predicting Long-Term Dark Storage Dye Stability Characteristics of Color Photographic Products from Short-Term Tests." *Journal of Applied Photographic Engineering*. **1980**. Vol. 6(2),S.42-45.
12. R. Korn und F. Burgstaller. *Papier- und Zellstoff-Prüfung*. **1944**. Berlin: Springer- Verlag.