



BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Langzeitbeständigkeit von Papier (Labest Papier)

FKZ 4719F90202

AUFTRAGNEHMER:IN

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische
Verfahrenstechnik der TU Darmstadt, Darmstadt

Dr.-Ing. Heinz Joachim Schaffrath
Dipl.-Chem. Antje Kersten
M.Sc. Niklas Schäfer



Langzeitbeständigkeit von Papier (Labest Papier)

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:in wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-017/24

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2024022841840

Berlin, März 2024

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

BASE – FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische
Verfahrenstechnik der TU Darmstadt, Darmstadt

Dr.-Ing. Heinz Joachim Schaffrath
Dipl.-Chem. Antje Kersten
M.Sc. Niklas Schäfer

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: März 2024

Labest Papier – Langzeit- beständigkeit von Papier

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik

Abschlussbericht „Labest Papier“

14.05.2023

Bearbeitung:

Dr.-Ing. Heinz Joachim Schaffrath, Projektleiter

Dipl.-Chem. Antje Kersten, Senior Researcher

M.Sc. Niklas Schäfer, wissenschaftlicher Betreuer

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel

Technische Universität Darmstadt

Alexanderstraße 8

64283 Darmstadt

Tel.: 06151 – 16 22580

Fax: 06151 – 16 22581

E-Mail: pmv@papier.tu-darmstadt.de

Kurzfassung

Im Projekt „Labest Papier– Langzeitbeständigkeit von Papier“ soll für das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) die Eignung von Papier, über mindestens 500 Jahre als dauerhaft unversehrter Informationsträger zu dienen, beurteilt werden. Das Projekt wird in die drei Arbeitspakete „AP1: Stand von Wissenschaft und Technik“, „AP2: Methoden zu Handhabung kritischer Schäden“ und „AP3: Entwicklung eines abgestimmten Systems Papier – Schreib-/Druckstoff“ gegliedert. Im AP1 wird anhand einer Literaturrecherche der Stand des Wissens zu Alterungsvorgängen bei Papier und deren Ursachen dargestellt. Dieser Teil der Arbeit zeigt auf, welche Faserrohstoffe eine günstige Altersentwicklung erwarten lassen und welche nicht. Auch bei der Papierherstellung verwendete Hilfsmittel finden ihre Berücksichtigung. Dieses Wissen hat bereits Eingang in die Normung gefunden, was einer Übersichtstabelle im Kapitel 2.3.5 entnommen werden kann (Tabelle 1). Erläuterungen und Bewertung zu den Normen finden sich im Bericht wieder. Eine Auswirkung der vorliegenden Arbeit war die Rückziehung der Normen ISO 5630-6 und -7, da sie sich als nicht tauglich erwiesen haben. Auch Normen zur Lagerung und zur Ausführung von Schriften und Drucken werden erwähnt, da diese Randbedingungen ebenfalls Einfluss auf die Papieralterung haben. Im Rahmen des AP2 werden die aus der Papierrestauration bekannten Schäden, ihre Ursachen und ihre Beseitigung dargestellt. Dazu gehören auch Maßnahmen zur Vorbeugung gegen solche Schäden. Dieses, zusammen mit den geschätzten Kosten für Gegenmaßnahmen, liegt zusätzlich in eine Access-Datenbank zusammengefasst vor. Die Maßnahmen erstrecken sich dabei nicht nur auf das Papier, sondern auch auf Schriften und Bilder. Im Gegensatz zur kulturhistorischen Notwendig, Originale möglichst unverändert zu erhalten, orientieren sich die vorgeschlagenen Maßnahmen an der Aufgabe, eine Information ausreichend gut zu erhalten, dass sie in mindestens 500 Jahren noch gelesen bzw. erkannt werden kann. Alterung wird somit in Kauf genommen, solange der Informationswert erhalten bleibt und die Handhabbarkeit der Dokumente noch ohne deren Zerstörung möglich ist. Im Laufe des AP3 wird anhand eines mit dem BASE abgestimmten Versuchsplans die Grundlage geschaffen, um aktuelle und zukünftige Papiersorten sowie die mit ihnen kombinierten Druckfarben und Druckverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Langzeitdokumentation einzuschätzen. Vielen der im AP1 genannten Aspekte, die eine Alterung begünstigen, kann durch eine sachgemäße Lagerung im Dunkeln, bei definierten Klimaverhältnissen und sauberer Umluft Rechnung getragen werden. Um Empfehlungen für die Lagerung abgegeben zu können, werden im Versuchsplan verschiedene Arten der Lagerung parallel getestet. Dazu gehören sowohl die beschleunigte Alterung bei erhöhter Temperatur als auch die Lagerung bei Kühlung und die gemeinsame und getrennte Alterung verschiedener Faserstoffe, um einen Eindruck zu deren gegenseitiger Beeinflussung zu erhalten.

Insbesondere die Versuche mit Laborpapieren bringen hier Aufschluss. Durch Herstellung ohne Hilfschemikalien liegen nur die reinen Faserstoffe mit etwas Calciumcarbonat als Alkalireserve vor. Dadurch können die Hauptfaserrohstoffe – gebleichter Zellstoff, ligninhaltiger Faserstoff und Linters – einzeln und in Kombination beurteilt werden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sich unterschiedliche Faserstoffe bei gemeinsamer Lagerung gegenseitig beeinflussen. In dieser Arbeit wird dies „Kreuzkontamination“ genannt. Der Hauptverursacher für ein schnelleres Abfallen von Festigkeitswerten während einer gegebenen Alterungszeit ist der ligninhaltige Faserstoff. Das starke Augenmerk, welches in den Normen für Archivierung von Dokumenten auf die Vermeidung von Lignin gelegt wird, hat somit seine Berechtigung und wird durch die vorliegende Arbeit erneut bestätigt. Jedoch findet auch ohne die Präsenz von Lignin eine Alterung statt und die Präsenz von Lignin führt nicht zwangsläufig zu einem so starken Abfall von Papierfestigkeiten, dass eine Nutzung nicht mehr möglich ist. Eine differenzierte Bewertung von ligninhaltigen Faserstoffen ist daher angebracht und wird bei der begründeten Empfehlung für ein abgestimmtes Systems Papier – Schreib-/Druckstoff (Kapitel 4.4.6) vorgenommen. Korrespondierend zu den Laborblättern wird eine Auswahl industriell hergestellter Blätter, bedruckt und unbedruckt, untersucht. Die Auswahl reicht von Papier, welches die differenzierten Anforderungen an die Alterungsbeständigkeit gemäß ISO 11108 erfüllt, über handelsübliches Büropapier auf Frischfaserbasis (Alterungsbeständig gemäß ISO 9706) und Recyclingbasis bis hin zu gestrichenen und ungestrichenen Papieren, wie sie für Broschüren oder Handbücher verwendet werden. Bei den Druckverfahren kommen die konventionellen Verfahren Offset und Tiefdruck, Flüssigtoner, Trockentoner sowie Inkjet mit zwei Farbformulierungen zur Testung. Somit können Aussagen zur Gesamtwirkung eines Papier- und Farbsystems getroffen werden. Die Lesbarkeit der Information hängt von der Neigung des Papiers oder der Druckfarbe zum Vergilben bzw. Verblässen ab. Mit Vergilbung des Papiers muss generell gerechnet werden, sei es wegen des Einsatzes ligninhaltiger Fasern oder optischen Aufhellern. Aber die auf dem Papier gedruckte Information geht dadurch im Allgemeinen nicht verloren, d. h. der Kontrast bleibt ausreichend für die Lesbarkeit von schriftlicher Information. Druckfarbe und Spezialpapiere jedoch, insbesondere für wärmenutzende Druckverfahren (Thermodruck), alte Hektographien („Spiritustrucker“) oder Blaupausen, verlieren über die Zeit an Kontrast und sind nicht mehr lesbar. Eine rechtzeitige Reproduktion solcher Dokumente ist unumgänglich!

Zur Abrundung des Versuchsplans werden einige natürlich gealterte Papiere, die mehr als 20 Jahre eingelagert waren, in die Untersuchungen mit einbezogen. Hier können Sonderbedingungen wie Stempelabdrucke, Kugelschreibernotizen und Einsatz von Korrekturflüssigkeit berücksichtigt werden. Auch Transparentpapiere und damit hergestellte Kopien technischer

Zeichnungen werden in diesem Block analysiert. Gemessen werden Festigkeitswerte, optische Kennwerte, fasermorphologische Eigenschaften und chemische Parameter. Da insgesamt ca. 10.000 Proben vorliegen, finden nicht bei jeder Probe alle Messungen statt. In Abstimmung mit dem BASE sind die Versuchspunkte so gesetzt, dass sie das Untersuchungsspektrum möglichst weit abdecken und Aussagen im Sinne einer begründeten Empfehlung für ein abgestimmtes System Papier – Schreib-/Druckstoff ermöglichen.

Im vorliegenden Abschlussbericht befindet sich zuletzt eine Bewertung der erhaltenen Ergebnisse sowie eine Empfehlung, welche Papiere besonders gute, gute oder ausreichenden Alterungsresistenz aufweisen. Der Einfluss der Druckverfahren und Farben wird deutlich, kann aber, bei Berücksichtigung der einschlägigen Vorschriften und Normen, als handhabbar gelten. Final findet eine Abschätzung der zu erwartenden Lebensdauer verschiedener Papiere statt. Hierzu werden verschiedene Ansätze gewählt und miteinander verglichen. Naturgemäß kann sich die Richtigkeit der gefundenen Aussagen erst in der Zukunft erweisen. Die Betrachtung der verschiedenen Prognoseergebnisse sowie vorliegende Messwerte zu natürlich gealterten Papieren lassen jedoch zu, dass Papiere benannt werden können, die die vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) geforderten 500 Jahre als Informationsträger mindestens überdauern werden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Inhaltsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
2 AP1: Stand von Wissenschaft und Technik	6
2.1 Literaturrecherche zur Alterungsbeständigkeit von Papierdokumenten.....	6
2.1.1 Papier	6
2.1.1.1 Historie der Papierherstellung mit Einfluss auf die Alterung	7
2.1.1.2 Untersuchung der Einflusskomponenten auf die Alterung	10
2.1.1.3 Untersuchungen zur Langzeitarchivierung	14
2.1.1.4 Besondere Betrachtung von Recyclingpapier.....	17
2.1.1.5 Prognosesicherheit von beschleunigten Alterungsverfahren	18
2.1.2 Tinten und Druckfarben	23
2.2 Bewertung DIN EN ISO 9706, „Rules for use of 'Archival Quality' certification trademark" und ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009).....	28
2.2.1 Begriffe	28
2.2.2 DIN EN ISO 9706.....	30
2.2.3 „Rules for use of `Archival Quality` certification trademark”	32
2.2.4 ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009).....	34
2.2.5 Bewertung und Empfehlung.....	35
2.2.6 Weitere Standards	35
2.2.7 Weitere Aspekte und Prüfmethode	38
2.3 Bewertung von DIN EN ISO 9706, DIN 6738, ISO 20494 und DIN ISO 5630	39
2.3.1 DIN EN ISO 9706.....	39
2.3.2 DIN 6738	39
2.3.3 ISO 20494	40
2.3.4 DIN ISO 5630	41
2.3.5 Bewertung und Empfehlung mit Vergleichstabelle	44
2.4 Vorteile der Langzeitspeicherung auf Papier gegenüber digitaler Speicherung..	50
2.4.1 Vorteile der analogen Speicherung auf Papier.....	50
2.4.2 Nachteile der digitalen Speicherung.....	51

2.4.3	Langzeitspeicherung auf DNA und Quarz	52
2.5	Offene Fragen und potentieller Forschungsbedarf	55
2.6	Fazit	57
3	AP2: Methoden zur Handhabung typischer Schäden.....	60
3.1	Typische, zu erwartende Schäden an Papierdokumenten	60
3.2	Formulierung begründeter Empfehlungen zum Umgang mit zu erwartenden Schäden an Papierdokumenten.....	71
3.2.1	Umgang mit spezifischen Papiersorten inkl. Recyclingpapier ab 1960.....	73
3.2.2	Vermeidung von Beeinträchtigungen farblicher Kennzeichnungen (Paraphen und Verfügungen)	82
3.3	Beschreibung anwendungsorientierter Methode zur Umsetzung der Empfehlungen zum Umgang mit typischen Schäden an Papierdokumenten	84
3.3.1	Kurzbeschreibung der Wirkprinzipien und technischen Ausführungen	85
3.3.2	Grenzen der Methoden	93
3.3.3	Aufwand zur Umsetzung der Methoden (Zeitbedarf, techn. Ressourcen, Personal, Kosten)	94
3.4	Weitere Schäden	100
4	AP3: Entwicklung eines abgestimmten Systems „Papier – Schreib-/Druckstoff“	103
4.1	Zu erwartende Schäden und deren Bewertung bei Verwendung nicht alterungsbeständiger Schreibstoffe und Papiere.....	103
4.1.1	Zu erwartende Schäden bezüglich Handhabung der Dokumente.....	104
4.1.2	Zu erwartende Schäden bezüglich Lesbarkeit der Dokumente	107
4.2	Erarbeitung einer Testreihe – Auswahl repräsentativer Schreib- und Druckstoffe	110
4.2.1	Im Labor aus gängigen Rohstoffen hergestellte Papiere	111
4.2.2	Gängige Industripapiere, unbedruckt, mit Berücksichtigung der Langzeitbeständigkeit	113
4.2.3	Gängige Industripapiere, bedruckt in gängigen Verfahren und Farbsystemen, mit Berücksichtigung der Langzeitbeständigkeit.....	116
4.2.4	Sondersorten und Sonderbedingungen.....	119
4.3	Messparameter und Zeithorizonte für beschleunigte Alterung	120
4.3.1	Physikalische Messparameter.....	122
4.3.2	Chemische Messparameter	126
4.4	Auswertung der Testreihen und begründete Empfehlungen	127

4.4.1	Auswertung der Festigkeitsveränderungen durch künstliche Alterung	127
4.4.2	Auswertung der optischen Veränderungen durch künstliche Alterung.....	157
4.4.3	Auswertung der Veränderung sonstiger physikalischer Parameter durch künstliche Alterung.....	180
4.4.4	Auswertung der Veränderung chem. Parameter durch künstl. Alterung	186
4.4.4.1	pH-Wert, Kappa-Zahl, Alkalireserve	186
4.4.4.2	Volatile Organic Compounds (VOC).....	206
4.4.5	Auswertung der Messwertschwankungen	213
4.4.6	Begründete Empfehlungen hinsichtlich Auswahl und Entwicklung eines bezüglich Langzeitbeständigkeit am besten abgestimmten Systems „Papier – Schreib-/Druckstoff“	218
5	Bewertende Zusammenfassung	228
6	Literaturverzeichnis.....	236
7	Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	251
8	Abkürzungsverzeichnis.....	257
9	Erläuterung einiger Fachbegriffe.....	260
10	Anlagen	265

1 Einleitung

Um die gewünschte Langzeitbeständigkeit eines auf Papier ausgefertigten Dokuments von 500 Jahren sicherzustellen, müssen sowohl der Informationsträger – das ist das Papier mit seinen verschiedenen Bestandteilen und Inhaltsstoffen – als auch die Information selbst – das sind die Druckfarben, Schreibtinten, Stempelfarben und weitere schrift- oder zeichengebende Mittel – sowie deren Umgebung (Beipackungen, Klima- und Lagerbedingungen) einbezogen werden.

Zu Beginn des Projektes „Labest Papier“ steht eine Recherche zum aktuellen Stand des Wissens (Arbeitspaket 1). Unterteilt nach Papier und Tinte findet sich eine Fülle an Literatur, wobei Tinten und Druckfarben deutlich unterrepräsentiert sind.

Vor diesem Wissenshintergrund finden sich im vorliegenden Bericht Zusammenstellungen und Bewertungen von Normen mit den Schwerpunkten Papierhaltbarkeit, beschleunigte Alterung, Lesbarkeit von Schriften und Schimmel- und Schädlingsbefall. Auch dem Aspekt der Qualitätsmerkmale von Büropapier und sonstiger Anforderungen an Papier für Büro Zwecke sowie der Lagerung und des Dokumentenmanagements wird kurz nachgegangen.

Papier hat ohne Frage einige wesentliche Vorteile gegenüber anderen Speichermedien, wenn auch im Sinne einer diversitären Redundanz auf andere Medien nicht verzichtet werden sollte. Ausführungen hierzu finden sich im Anschluss an die Betrachtungen zu den weiteren Aspekten zu Papierlagerung und Papiereinsatz.

Diese Literaturrecherche wurde mithilfe der TUFind-Funktion durchgeführt, wodurch auf alle Datenbanken zugegriffen werden konnte, auf welche die Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt Zugriffsrechte hat. Des Weiteren konnte über die Datenbank Perinorm (mittlerweile Nautos) frei auf DIN-Normen im Volltext zugegriffen werden, Normen anderer Staaten werden ebenfalls aufgeführt, müssen aber kostenpflichtig erworben werden. Zudem hat das Fachgebiet PMV eine Lizenz der Literaturdatenbank Paperbase, die ebenfalls genutzt wurde. Weiterhin wurde recherchiert über das Forschungsnetzwerk ResearchGate und über den online-Suchdienst Google Scholar. Letztendlich wurde auch mithilfe der üblichen Suchmaschinen im Internet recherchiert. Eine Auflistung der genutzten Schlagwörter findet sich im Anhang. Literaturstellen wurden in eine Citavi-Datenbank aufgenommen.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde auch der Kontakt zu Archivaren, Restauratoren, Konservatoren und Druckinstituten hergestellt. Die in den Gesprächen gewonnenen Erkenntnisse wurden protokolliert und fließen ebenfalls in diese Studie ein. Des Weiteren fließen die im eigenen Labor des Fachgebiets gemachten Erfahrungen aus Prüfaufträgen zur Beurteilung

von Papier- und Schriftalterung mit ein, ebenso wie die in Normungsausschüssen erhaltenen Informationen.

Auch wurde Kontakt zu verschiedenen europäischen Ländern gesucht, um zu einem Gedanken- und Erfahrungsaustausch bezüglich der Langzeitdokumentation von zivilnuklear relevanten Dokumenten zu kommen. Kontaktiert wurden Groß-Britannien, Schweden, Finnland, Frankreich und die Schweiz. Frankreich und Schweden haben auf die Kontaktfanfrage nicht reagiert. Die anderen Länder haben wie folgt reagiert:

1. Finnland: Die zuständige Behörde (STUK) verweist auf das National Archive of Finland, welches aber nur Regularien darüber bereitstellt, welche Dokumente langzeitarchiviert werden müssen, nichts zu den Bedingungen. Zudem wird auf ein neues Gesetz verwiesen, nach welchem finnische Behörden angewiesen sind, Dokumente ab sofort in elektronischer Form zu speichern.
2. Schweiz: Die zuständige Behörde (ENSI) legt den Fokus auf die digitale Archivierung. Die Anforderungen an die Aufbewahrung von Dokumenten zu Kernanlagen werden aktuell in der Richtlinie ENIS-G09 überarbeitet, welche bezüglich Archivierung von Schriftdokumenten auf die DIN ISO 11799 [DIN ISO 11799:2017] verweist. Weitere Anforderungen werden an Papier nicht spezifiziert.
3. Groß-Britannien: Die zuständige Behörde (NDA) betreibt am Standort Caithness das nationale Archiv „NUCLEUS“, welches sowohl digitale als auch mikroverfilmte und papierbasierte Dokumente archiviert. Großer Wert wird auf das Informationsmanagement gelegt, welches in der Vorschrift IMP06 [NDA, 04/2019] beschrieben wird. Betreuung nur durch ausgebildete Personen, Identifikation von Bedrohungen und Maßnahmen zu deren Abwehr, gesicherte Verfügbarkeit bei Bedarf, Sicherstellung der Sinnhaftigkeit von Information und deren Relevanz und Informationsmigration sind einige Stichworte hierzu. So werden Daten ab 1940 gesichtet und nur bei dauerhafter Wichtigkeit behalten, sonst vernichtet. Metadaten spielen eine große Rolle, damit bei Verlust eines Schriftstücks die Information aus anderen Schriftstücken rekonstruiert werden kann. Man setzt auf den „Dreiklang“ der Archivierung, d.h. Papier, Mikrofilm und digital (momentan PDF-A-Format).

Aufbauend auf den Arbeiten von Ernest Rutherford und Enrico Fermi hatten Otto Hahn mit seinem Mitarbeiter Fritz Straßmann am 19. Dezember 1938 die Kernspaltung der Atome beobachtet, Lise Meitner konnte mit ihrem Neffen Otto Frisch die physikalische Erklärung dazu liefern, der Begriff „Kernspaltung“ (nuclear fission) wurde durch letzteren geprägt [*Die Entdeckung der Kernspaltung*, 23. Februar 2021]. Seitdem fand über die militärische Nutzung die Kernenergie ihren Weg in die zivil-nukleare Energiewirtschaft. Etwa 110 kerntechnische

Anlagen wurden in Deutschland zwischen 1957 und 2004 in Betrieb genommen [Wikipedia, 2020b]. Bezieht man die vorangegangene Planung dieser Anlagen nebst wissenschaftlichen Ausarbeitungen ein, so muss man sich bei zivil-nuklearen Dokumenten auf eine Datierung ab 1950 und früher einstellen. Damit fällt ein nicht unerheblicher Teil der zu beachtenden Dokumente in die „gefährliche“ Zeit des massiven Zerfalls von sauer hergestellten Papierprodukten zwischen 1850 bis ca. 1980. Dies ist die Motivation für das Arbeitspaket 2 „Methoden zur Handhabung typischer Schäden“.

Insgesamt deckt das Spektrum der zu erwartenden Papiere und Schriften schon jetzt einen Zeitraum von mehr als 70 Jahren ab. Papiertechnologisch fällt in diesen Zeitraum die Abkehr von der sauren Leimung mit Aluminiumsulfat, die Zunahme von Altpapier als Faserrohstoff sowie dessen Nutzung in graphischen Papieren (z.B. Recyclingpapier), die Zunahme von gestrichenen Papieren und der verstärkte Einsatz von chemischen Additiven, vom optischen Aufheller bis hin zu Entwässerungshilfsmitteln und Störstofffixierern.

Drucktechnisch fällt in diesen Zeitraum die Entwicklung der Kopierer und Bürodruker, sowohl Nadeldruker als auch Laser-, Thermo- und Inkjet-Drucker. Die Druckfarben der klassischen Druckverfahren Hochdruck, Tiefdruck, Offsetdruck und Siebdruck werden weiterentwickelt, basieren auf Mineralöl, pflanzlichen Ölen, Wasser und Lösungsmitteln als Farbtransportern und werden immer mehr mit Additiven zur Unterstützung der Wirtschaftlichkeit des Druckvorgangs versehen. Digitaldruck, Flüssigtoner und UV-vernetzende Farben sind momentan der letzte Stand dieser Entwicklungsreihe.

Auch die Büro- und Kommunikationstechnik entwickelt sich. War in den 50er Jahren noch die Schreibmaschine mit Kohlepapierdurchschlag üblich, kamen im Laufe der Zeit immer mehr die NCR-Papiere (no carbon required; Selbstdurchschreibepapiere) in Benutzung, insbesondere für Quittungen und Frachtpapiere. Transparentkleber, Klebestifte, Korrekturflüssigkeiten, Heft- und Büroklammern, Ringbindung, Schnellhefter und eine Fülle weiterer Artikel mehr helfen, den Büroalltag zu organisieren, können aber im Laufe der Zeit zu Quellen für Schäden an Papierdokumenten werden.

In den Arbeitspaketen AP1 und AP2 sind wesentliche Ergebnisse hinsichtlich zu erwartender Schäden, deren Ursachen und Vermeidung sowie deren Beseitigung oder zumindest Linderung erarbeitet worden. Da diese Erkenntnisse auch andere Bereiche neben dem Bundesamt für die Sicherheit der Nuklearen Entsorgung betreffen, nämlich Archive und Notare, können die dort vorliegenden Methoden zum Langzeiterhaltung papiergebundener Information in weiten Teilen auch für das Projekt „Labest – Langzeitbeständigkeit von Papier“ herangezogen

werden. Vor allem die Dienstordnung für Notare (DONot 2020) und die Normen zur Bestandserhaltung in Archiven sowie zur Dokumentation, zusammengefasst in (Allscher und Haberdtzl 2019) und (DIN-Taschenbuch 343 2018), bieten hier gute Richtlinien.

Im vorliegenden Projekt kommen weitere Aspekte zum Tragen, die in den genannten Normen nicht oder aus anderer Perspektive betrachtet werden. In der Dienstordnung für Notare geht es z. B. um Urkunden, die mit besonderer Sorgfalt hergestellt werden, der Blickwinkel des Archivs richtet sich auf das möglichst im Originalzustand Kulturgut. Die bei der Planung und dem Bau einer industriellen Anlage, wie sie ein Kernkraftwerk oder eine atomare Lagerstätte darstellt, verwendeten Dokumentationsmittel haben diese Aspekte nicht im Blick. Es geht bei den Dokumenten um Handhabbarkeit an der Baustelle, Begleitschreiben für Versand und Montage, Lesbarkeit, Vervielfältigungsmöglichkeit und effiziente Bereitstellung von Information am Ort des Aufbaus und des Betriebens. Mittelfristige Dokumentation, etwa für Handbücher, Rohr- und Instrumentierungspläne, Wartungshinweise, Prüfsertifikate etc., ist indirekt abgedeckt, wenn mit handelsüblichen Papieren, Druckern und Kopierern gearbeitet wurde. Sie ist nicht abgedeckt, wenn Thermodrucker, Hektographie oder lichtempfindliche Blaupausen zum Einsatz kamen.

Dieser pragmatische, eher an technischer Umsetzung eines aktuellen Projektes orientierte Ansatz zur Dokumentation macht es erforderlich, Randbedingungen für Dokumente, die von den Normen und Regelwerken abweichen, besser zu verstehen, um deren Auswirkungen besser abschätzen zu können. Nähme man das laut Archiv-Normen am besten geeignete Papier mit am besten geeigneten Druckfarben, so ginge dies an der Realität vorbei, da schon über 70 Jahre Dokumente erzeugt wurden, die diesen Anforderungen oft nicht entsprechen. Zudem muss ein vorgeschriebenes Papier in ausreichender Menge auf dem Markt verfügbar sein. Des Weiteren ist zu hinterfragen, welche Anforderungen zwingend benötigt werden und welche nur dem optimalen Zustand der Langzeitdokumentation dienen. Ein Papier, welches die höchsten Anforderungen der italienischen Norm (UNI 10332) für beständige Papier erfüllt, wird aufgrund der besonderen Faserstoffe (Hadern) und der speziellen Randbedingungen (Limitierung des Kupfer- und Eisenionengehalts) bei der Herstellung nur begrenzt und für teures Geld auf dem Markt zu bekommen sein. Gleiches, wenn auch schon abgeschwächt, gilt für Papiere, die der ISO 11108 genügen, da der Rohstoff Hader, der für diese Papiere überwiegen muss, nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung steht. Diesem Umstand trägt die Norm ISO 9706 bereits Rechnung, indem sie die oxidierenden Bestandteile limitiert und damit das Lignin quasi eliminiert.

Hieraus resultiert im Arbeitspaket 3 „Entwicklung eines abgestimmten Systems Papier – Druck-/Schreibstoff“ der Ansatz, die Hauptfaserstoffquellen für Papier, nämlich Hadern, gebleichten Zellstoff und ligninhaltige Fasern, in ihrer reinen Form im Labor unter definierten Bedingungen zur Blattbildung heranzuziehen und so den jeweiligen Einfluss und das Alterungsverhalten getrennt studieren zu können. Die Ergebnisse hierzu finden sich im Kapitel 4.2.1 dieses Berichts.

Zu den Laborblättern aus reinen Faserstoffen korrespondieren industriell hergestellte Blätter, die unbedruckt und bedruckt untersucht wurden. Die Auswahl richtete sich nach marktgängigen, industriell in Massen hergestellten und auch als Informationsträgern eingesetzten Papieren. Das schließt handgeschöpfte Sonderpapiere ebenso aus wie reine Verpackungspapiere oder Tissue-Produkte. Die unbedruckten Papiere, in denen sich die Faserstoffe der Laborpapiere wiederfinden, finden sich im Kapitel 4.2.2 dieses Berichts. Hierzu gehören Recyclingpapier ebenso wie nach ISO 9706 hergestellte Papiere wie auch gestrichene Papiere, deren Alterungsbeständigkeit kritisch gesehen wird, mit deren Nutzung bei Broschüren oder ähnlichem man aber rechnen muss.

Von der Auswahl der Papiere wurden einige bedruckt, die Ergebnisse der Alterungsversuche finden sich im Kapitel 4.2.3. Bei den Druckverfahren wurden Offset und Tiefdruck sowie Inkjet und Trockentoner berücksichtigt. Bei der Vielzahl von möglichen Kombinationen wurde so eingeschränkt, dass eine breite Aussage zu Papier – Schreib-/Druckstoffkombinationen möglich ist und so die gewünschte Empfehlung hinsichtlich geeigneter Paarungen abgegeben werden kann.

Alle Proben wurden auf Festigkeitswerte, optische Werte, chemische Werte und fasermorphologische Veränderungen untersucht. Nicht an allen Proben wurde alles gemessen, um den Aufwand vertretbar zu halten. Jedoch verlaufen die Messungen so, dass im betrachteten Zeitraum von 16 Monaten natürlicher und künstlicher Alterung Aussagen zum Alterungsverlauf möglich sind. Als Ergänzung wurden zudem Papiere, die natürlich über 20 Jahre oder mehr gealtert sind, in die Auswertung mit einbezogen (siehe Kapitel 4.2.4).

2 AP1: Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Literaturrecherche zur Alterungsbeständigkeit von Papierdokumenten

Die Literaturrecherche umfasst anerkannte und bewährte Methoden zur Einschätzung der Alterungsbeständigkeit von Papierdokumenten zusätzlich zu den einschlägigen Normen. Eine Gewährleistung, wie in der Leistungsbeschreibung formuliert, kann seriöser Weise keine der betrachteten oder auch neu vorzuschlagenden Messungen bieten. Nach heutigem Kenntnisstand können jedoch eine wahrscheinliche Alterungsresistenz abgeschätzt und mögliche Parameter, die dies positiv bzw. negativ beeinflussen, benannt werden. Für Aussagen dazu legt die folgende Zusammenstellung des Wissens um die Alterung von Papier die Grundlage, wobei die Art und Weise dessen Generierung ebenfalls genutzt werden können.

Die zitierten Literaturstellen sind in einer CITAVI-Literaturdatenbank hinterlegt, welche dem BASE zur Verfügung gestellt wird. In vielen Fällen sind die zugehörigen Volltexte frei zugänglich bzw. unter der Voraussetzung einer nicht-kommerziellen Verwertung nutzbar. Diese Texte sind in die Datenbank eingebunden.

2.1.1 Papier

Legt man die Bandbreite der verschiedenen in der Literatur zu findenden Zeiträume zugrunde, so sind Papiere, die zwischen 1820 und 1990 hergestellt worden sind, durch ihre Roh- und Inhaltsstoffe sowie durch die Herstellungsweise einem verstärkten chemischen Abbau ihres festigenden Bestandteils, nämlich der Cellulose, durch Hydrolyse und Oxidation ausgesetzt (Anders 2009), (Nitrochemie 2020).

Als Grund wird die Verwendung von ligninhaltigen Fasern genannt, ebenso der Übergang von tierischen Leimen und Stärkeleimen zu anderen Leimungsarten mit Harzen oder Harzseifen sowie die Verwendung von Aluminiumsulfat (oft auch „Alaun“ genannt) als Fixiermittel, Retentionsmittel und Entwässerungshilfsstoff. Ursache ist im Wesentlichen, dass der Sulfatanteil im Alaun über die Jahre eine Wirkung wie Schwefelsäure hat und die Papierfasern angreift. Zudem wird den verwendeten Harzen zugeschrieben, dass sie bei ihrer eigenen Alterung wiederum Moleküle freisetzen, die die Oxidation der Cellulose begünstigen. Eine breite Untersuchungsserie dazu wurde am Lehrstuhl für Cellulosechemie der damaligen Technischen Hochschule Darmstadt (heute TU Darmstadt) von Koura zusammen mit Prof. Krause angefertigt und veröffentlicht ((Koura und Krause 1977) bis (Koura und Krause 1979)). Abgedeckt wurden die Aspekte Ligninfreiheit der Faserstoffe, Einfluss der Mahlung, Einfluss des pH-Wertes bei der Papierherstellung, Einfluss der Harzleimung und letztendlich die Möglichkeit der Schadensbehebung durch Behandlung mit alkalischen Ammoniaklösungen. Auch in der weiteren Literatur werden die dort gefundenen Erkenntnisse bestätigt (siehe z. B. (Bansa 1980), (Cernic

und Vodopivec 1997), (Walenski 2003), (Anders 2009), (Zervos 2010) oder (Bellendorf 2012)) sowie noch um Aspekte des Einflusses von Klimaschwankungen (Behrens et al. 1994) oder der Angriffe durch Luftschadstoffe, Metallionen und Additive, Schweißübertragung beim Anfasen von Papier ((Fellers 1989) und durch biologische Zersetzung (Marie Cristina Area et al. 2011)) erweitert.

Ein Literaturüberblick zur natürlichen und künstlichen Alterung von Cellulose aus dem Jahre 2010 (Zervos 2010) stützt ebenfalls die meisten bis dahin bekannten Aussagen. Allerdings findet sich hier auch der klare Hinweis, dass Lignin eine schützende Funktion für die Cellulose hat, da eine antioxidative Wirkung nachgewiesen wurde.

2.1.1.1 Historie der Papierherstellung mit Einfluss auf die Alterung

Setzt man diese Aussagen zur Papierhistorie in Relation, so sind folgende Entwicklungsstufen in diesem Zusammenhang zu nennen (Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. 2003), ergänzt durch (Martorana 2010):

- 1294 – Einführung der tierischen Leimung in Fabriano/Ancone, Italien
- 1799 – Erfindung der Langsiebpapiermaschine
- 1792 – Erste Bleiche mit Chlorwasser durch die Gebrüder Taylor
- 1806 – Erfindung der Harzleimung durch Illig bei Darmstadt
- 1843/44 – Erfindung des Holzschliffs durch F.G. Keller, Sachsen
- 1883 – Zweite Anlage zur Sulfitzellstoffherstellung in Säffle, Schweden
- 1884 – Erfindung der Sulfatzellstoffherstellung durch C.F. Dahl, Deutschland
- 1956 – Patent zur AKD-Leimung (Alkylketendimere)
- 1960 – Entwicklung der Rohstoffe RMP, TMP und CTMP
- 1964 – Patent zur ASA-Leimung (Alkenyl Succinic Anhydride)
- 1966 – Entwicklung der Doppelsiebpapiermaschinen
- 1970 – Neutralleimung mit AKD findet Einzug in die Papierherstellung
- 1985 – Entwicklung der chlorfreien Bleiche

Diese Auflistung wurden unter zwei Perspektiven zusammengestellt:

Unter dem ersten Blickwinkel finden sich die Zeitpunkte wieder, ab denen man mit einer veränderten chemischen Zusammensetzung der Papiere rechnen muss.

So waren vor 1294 Stärkeleim und pflanzliche Schleimstoffe im Einsatz, was sich in den bis heute erhaltenen Papieren aus dem arabischen Kulturraum findet. Der ab dann in Europa Einzug findende Leimungsprozess mit tierischen Leimen (Gelatine) führte immer noch zu Produkten, die aus Alterungssicht unkritisch gesehen werden. (Behrens et al. 1994)

Mit der Chlorbleiche kommt Ende des 18. Jahrhunderts erstmalig ein stark oxidierender Hilfsstoff ins Papier, der die Alterungsprozesse bei Papier beschleunigen könnte, gefolgt von der Harzleimung ab Beginn des 19. Jahrhunderts. Dass insbesondere die Harzleimung mit dem damit verbundenen Einsatz von Sulfatsalzen einen deutlichen Impact auf die Alterung von Papier hat, passt zu den Beobachtungen, dass schon vor Erfindung des Holzschliffs und damit vor dem Einsatz von ligninhaltigen Fasern Versprödung von Papierbeständen in den Archiven beobachtet werden konnte.

Nachdem Holz als Faserstoffquelle zunächst ligninhaltig über den Holzschliff zur Verfügung stand, war nach der Einführung der Zellstoffkochung und -bleiche über das Sulfit- und das Sulfatverfahren ein ligninfreier Faserstoff verfügbar, der jedoch aus Cellulose und Hemicellulose bestand. Lignin ist bei der Alterung auffällig, da es stark zur Vergilbung neigt. Dies wird als Indikator für eine beschleunigte Alterung angesehen ((Cernic und Vodopivec 1997), gestützt von Untersuchungen, nach denen ligninhaltige Papiere bei Lichtalterung saure Abbauprodukte bilden (Forsskahl I und Tylli H 2001).

Von der Faserstoffseite ist der nächste Schritt die Entwicklung der Refinerholzstoffe RMP (Refiner Mechanical Pulp), TMP (Thermomechanical Pulp) und CTMP (Chemo-Thermomechanical Pulp) zu nennen. Während RMP und TMP quasi eine reine Weiterentwicklung des Holzschliffs sind, ist CTMP eine Zwischenstufe aus Zellstoff und Holzstoff, da zwar noch Lignin im Faserstoff enthalten ist, aber deutlich weniger als im Holzstoff.

Bei der Papierleimung setzt sich ab den 70er Jahren mehr und mehr die Neutralleimung durch, vor allem mit Alkylketendimeren. Getrieben war dies durch den Wunsch, Calciumcarbonat als Füllstoff und Streichpigment einsetzen zu wollen, da dies deutlich günstiger als das herkömmliche Pigment Kaolin ist. Über die immer stärker werdende Nutzung von Altpapier als Faserstoffquelle kommt das Calciumcarbonat in die Papierfabriken zurück und führt durch seine Zersetzung im sauren Milieu (wie für die konventionelle Harzleimung erforderlich) zu erheblichen Prozessproblemen, weswegen die Papierfabriken zunehmend auf Neutral- oder Alkalfahrweise umstellen.

Schaut man sich die Jahrgänge der Veröffentlichungen und Forschungsarbeiten zur Papierleimung an, dann dominieren in den 70er Jahren noch Titel, die sich mit Harzleimung im neutralen Bereich befassen. Ein in dem Zeitraum erschienenes Buch zu dem Thema (Kaltenbach 1974) erhebt zwar den Anspruch, sich mit den Nebenproblemen der „neuzeitlichen“ Leimung zu befassen, geht aber gar nicht auf die Alterungsproblematik ein. In den 80er Jahren folgen dann Arbeiten zur Neutralleimung mit AKD, etwa ab Anfang des neuen Jahrtausends finden sich mehr und mehr Arbeiten zur ASA-Leimung mit Alkylbernsteinsäureanhydrid (Alkenyl Succinic Anhydride), dem jüngsten Leimungsmittel.

Vor dem Hintergrund erscheint es plausibel, dass ab den 90er Jahren das Problem der Papieralterung in den Archiven zurückgegangen ist, da die entsprechenden Papiere zur Verfügung standen und von Archivaren für bestimmte Dokumente die Einhaltung der mittlerweile entwickelten einschlägigen Normen eingefordert wurde.

Passend dazu schließt sich der Kreis, der mit Einführung der Chlorbleiche 1792 eröffnet wurde, durch Einführung der chlorfreien Bleiche ab 1985, was auch seinen Niederschlag in den Archiven ab den 90er Jahren finden könnte. Chlorfreie Bleiche wurde jedoch aus Umweltsichtspunkten entwickelt, zunächst als „elementarchlorfrei“ (ECF-Zellstoff), dann als „total chlorfrei“ (TCF-Zellstoff).

Der zweite Gesichtspunkt der historischen Auflistung bezieht sich auf wesentliche mechanische Eigenschaften der hergestellten Papiere. So wurde Papier jahrhundertlang von Hand als Bogen geschöpft. Meisterliches Können vorausgesetzt, spielte in dem Fall die Orientierung der Fasern keine Rolle, das Material kann in seiner Blattebene als isotrop hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften betrachtet werden.

Mit Beginn der industriellen Produktion nach Erfindung der Langsiebpapiermaschine 1799 änderte sich dies. Die Papierfasern bekamen jetzt eine Vorzugsrichtung in Laufrichtung der Endlosbahn, Maschinenrichtung oder MD (machine direction) genannt. In dieser Richtung sind die Festigkeiten höher, die Dehnung geringer und das Spannungs-Dehnungsverhalten steifer. Konträr dazu ist das Spannungs-Dehnungsverhalten in Querrichtung (cross direction, CD) weicher, die Bruchkraft geringer, das Papier zeigt in dieser Richtung höhere plastische Verformbarkeit und eine höhere Dehnung. Die Materialeigenschaften in Blattebene werden als orthotrop angesehen. Diese Tatsache findet sich in den Untersuchungen zum Verhalten von Papier bei zyklischen Klimaschwankungen wieder (z. B. (Behrens et al. 1994)). Ursache ist die Orientierung der Fasern in Längsrichtung während der Aufbringung auf das laufende Endlossieb. Infolge davon kommt es, unterstützt durch Zugkräfte zur Erhaltung der Bahnstabilität während des Laufs der Papierbahn durch die Papiermaschine, zu einer deutlicheren Schrumpfung der Papierbahn in Querrichtung (ca. 6 %) als in Längsrichtung (ca. 2 %; beide Angaben sind als Größenordnungen zu werten und schwanken von Papier zu Papier und vor allem von Papiermaschine zu Papiermaschine). Neubauten von Papiermaschinen können diesen Längs-Querunterschied mildern, da seit den 90er Jahren einreihige Trockenpartien angeboten werden, die ein Schrumpfen in Querrichtung vermindern. Die höheren Kapitalkosten für solche Maschinen lassen jedoch nicht jeden Investor zu dieser Lösung greifen.

Außer in der Blattebene bzw. Papierbahnebene zeigt Papier aber auch zwischen Ober- und Unterseite teilweise deutliche Unterschiede. Dies war schon zur Epoche der manuellen Papierherstellung so. Aus der Zeit stammen die Begriffe „Siebseite“ und „Oberseite“, wenn die

Zweiseitigkeit des Papiers differenziert werden soll. Wichtig ist dies zum einen für die Bedruck- bzw. Beschreibbarkeit, da ein Schriftbild auf der rauhen Siebseite sich tendenziell schlechter darstellt als auf der glatten Oberseite. Zum anderen sind dadurch die mechanischen Eigenschaften über die Papierdicke nicht gleichmäßig, was zu einem Bimetalleffekt führen kann. Insbesondere bei einseitigen Druckvorgängen mit thermischen Einflüssen, wie etwa in einem Kopierer, können sich die Unterschiede zwischen Ober- und Siebseite gravierend bemerkbar machen. Maschinentechnisch wurde hier ab 1966 mit der Entwicklung von Doppelsiebmaschinen, bei denen die Papierbahn sowohl nach oben als auch nach unten entwässert wird, ein großer Entwicklungsschritt vollzogen.

Abschließend sei noch erwähnt, dass industriell hergestellte Papiere mittlerweile mithilfe eines erheblichen Aufwandes an Reglern, Prozesskontrolle und Qualitätsleitsystemen produziert werden. Dadurch ist die primäre, ungealterte Qualität deutlich geringeren Schwankungen unterworfen als zu Zeiten manueller Herstellung möglich.

Die technische und technologische Entwicklung der Papierherstellung ist getrieben von hohen Kapitalkosten für die eingesetzten Maschinen, hohen Rohstoffkosten für die einzusetzenden Fasern und hohen Energiekosten. Da ständig in den Unternehmen nach Möglichkeiten zur Kosteneinsparung gesucht wird, führt dies in Folge zu immer mehr eingesetzten Hilfsmitteln, sogenannten Additiven. Diese helfen, die Qualität zu garantieren (so etwa Leimungsmittel), die Produktion zu erhöhen (so etwa Entwässerungshilfsmittel) oder die Rohstoffkosten zu senken (so etwa Retentionshilfsmittel bzw. der Einsatz vom CTMP als Zellstoffersatz). Mit Lieferanten von Additiven für die Papierindustrie wurden am Fachgebiet PMV z. B. auch schon Versuche mit Enzymen durchgeführt, welche den spezifischen Energieverbrauch für die Herstellung einer Tonne Papier senken können. Wasserkreisläufe werden zum Schutz der Umwelt eingeeengt oder geschlossen, was den Einsatz von Bioziden nötig macht. Die Auswirkungen dieser neuen Hilfsmittel und Änderungen in den Prozessführungen sind in den Archiven vermutlich noch nicht bemerkbar, da technologische Änderungen in der kapitalintensiven Papierindustrie erfahrungsgemäß 10 bis 20 Jahre brauchen, um sich durchzusetzen – und selbst dann sind alte Verfahren noch nicht vollständig abgelöst. In einer Dissertation (Martorana 2010) findet sich, dass noch im Jahr 2006, über 40 Jahre nach den Patenten für AKD und ASA, Harzleim einen Marktanteil von 67 % an den Papierleimungsmitteln hat, gefolgt von AKD mit 16 %, ASA mit 11 % und polymeren Oberflächenleimungsmitteln von 6 %.

2.1.1.2 Untersuchung der Einflusskomponenten auf die Alterung

Das Themengebiet der Langzeitstabilität von Papier ist schon recht alt und wird von einer sehr großen Anzahl von Veröffentlichungen und wissenschaftlichen Arbeiten über die Jahre beglei-

tet. Immer wieder finden sich Zusammenfassungen in Forschungsberichten oder Literaturübersichten wie bei (Kantrowitz, M. S. et al. 1940) oder (J.G. 1932). Letzterer bezieht sich auf einen Report für die Royal Society of Arts mit der Empfehlung, dass in alterungsbeständigen Papieren mindestens 70 % der Fasern als Stofflumpen (Leinen, Hadern, Flachs, Linters) und nicht mehr als 10 % ligninhaltige Beimengungen (Holzstoff und Strohzellstoff) enthalten sein dürfen. Außerdem finden sich hier schon die Hinweise, dass der α -Cellulosegehalt (im Wesentlichen die eigentliche, auf Glukosemonomeren beruhende Cellulose) möglichst hoch sein soll, die Azidität des Papiers, der Harzgehalt und die Kupferzahl (ein Maß für Hydrolyse- und Oxidationsstatus von Cellulose, aber auch beeinflusst durch den Ligningehalt; (TAPPI 430 cm-99)) dagegen niedrig. In jedem Fall übt die sachgerechte Lagerung einen großen Einfluss auf die Alterung aus.

In einem Projektbericht für das schwedische Reichsarchiv (Fellers 1989) werden eine ganze Reihe von Aspekten in einer Literaturrecherche zusammengefasst. Das Autorenkollektiv umfasst die Jahre von 1935 bis 1987 vor allem amerikanischer, englischer, schwedischer und finnischer Literatur, aber auch deutscher, französischer und niederländischer Beiträge.

In dem Report finden sich neben Expertisen zu Einflüssen und Auswirkungen von chemischen und physikalischen Alterungsprozessen auch Daten zu natürlich gealterten Papieren. Zitiert werden Daten aus einer Studie, bei der 4 Papiere im Jahr 1937 auf einer Experimentalmaschine gefertigt und untersucht wurden. Vorteil dieser Vorgehensweise war, dass die Herstellungsbedingungen, anders als bei industriell hergestellten Papieren, klar definiert werden konnten. Nach 36 Jahren natürlicher Alterung „unter Bürobedingungen“ wurden die Papiere erneut getestet. Es zeigte sich, dass auch reine Baumwollpapiere deutlich altern, wenn Aluminiumsulfat zugesetzt wurde. Zudem zeigte sich, dass die mechanischen Eigenschaften Bruchdehnung, Doppelfalzzahl und Durchreißfestigkeit sensitiv auf Alterung reagieren, die Bruchkraft dagegen nicht. Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass die Reißfestigkeit der Faser selbst zwar sinkt, die Bruchkraft des Fasernetzwerks aber durch Bindungskräfte von Faser zu Faser determiniert ist, die während der Alterung durch Ausbildung weiterer Wasserstoffbrückenbindungen („Cross-Linking“) sogar steigen können.

Chemische Anzeichen für gealterte Cellulose sind die schon früher (J.G. 1932) erwähnten Parameter α -Cellulose, Kupferzahl und pH-Wert des Kaltwasserextraktes. Alle diese Parameter detektieren Hydrolyse, Oxidation und andere Depolymerisationsvorgänge. Vor allem SO_2 beschleunigt die hydrolytischen Vorgänge, wobei die Präsenz von Übergangsmetallen (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn etc.) die Oxidation katalysiert. Leider sind diese Vorgänge so komplex, dass eine Vorhersage von Alterungsprozessen über reaktionskinetische Annahmen nach Meinung

der Autoren nicht zu sicheren Ergebnissen führt, obwohl eine Korrelation zwischen natürlicher und künstlicher Alterung bejaht wird.

Wegen der starken Abnahme der Doppelfalzzahl während der Alterung gehen die Autoren näher auf diesen Test ein und erläutern den Unterschied zwischen Doppelfalzzahl (Anzahl von Doppelfaltungen an einem Papierstreifen bis zum Bruch) und dem Doppelfalzwidestand (folding endurance; der Logarithmus zur Basis 10 der Doppelfalzzahl). Letzterer ist der eigentlich aussagekräftige Wert.

Der ausführlichste Punkt des Reports für das schwedische Reichsarchiv behandelt die chemischen Reaktionen während der natürlichen und der künstlichen Alterung. Hemicellulosen (solche natürlichen Polysaccharide, die nicht Glukose als Monomer haben, unterteilbar in Pentosen und Hexosen) altern schneller als Cellulose. Während der Alterung verschiebt sich der Anteil amorpher Strukturen hin zu kristalliner Struktur, was zu einem Abbau innerer Spannungen in der Faser führt und einen höheren Elastizitätsmodul zu Folge haben kann. Zusammen mit dem bereits erwähnten Cross-linking führt dies zur Versprödung. Durch Oxidation der Polysaccharide entstehen im Papiergefüge Abbauprodukte, die wiederum oxidativen Charakter haben und dadurch zu einer Autooxidation und damit beschleunigten Alterung der Komponenten beitragen. Im Bericht sind die stattfindenden chemischen Reaktionen detailliert dargestellt.

Photochemische Prozesse spielen bei diesen Reaktionen eine untergeordnete Rolle, jedoch darf dies nicht damit verwechselt werden, dass Vergilbung sehr wohl stattfindet. Allerdings ist vom Ausmaß der Vergilbung nicht unbedingt auf den Depolymerisationsgrad zu schließen.

Umwelteinflüsse wirken sich deutlich auf den Alterungsprozess aus. Zunehmende relative Luftfeuchte und zunehmende Temperatur beschleunigen Zersetzungsprozesse, die sich sowohl mechanisch als auch chemisch zeigen. Die Autoren zitieren dazu Messungen der Nullreißlänge (dabei wird ein Papierstreifen mit nur 0,7 mm Einspannlänge zerrissen (TAPPI 231 cm-96), wodurch die Reißfestigkeit der Einzelfaser eine hohe Bedeutung bekommt; allerdings spielt auch das Fasergefüge im Blatt und die Längs-Querverteilung der Fasern eine Rolle). Der Gehalt an Sauerstoff während der Lagerung wirkt sich vor allem verstärkend auf die Vergilbung aus, die Festigkeit (nur gemessen als Bruchkraft) ist davon nicht betroffen. Luftverschmutzung spielt (neben Partikelverschmutzung über Staub, Salze, Asche, Sporen, Schmutz und Pilze) vor allem durch die Schadgase SO_2 , NO_x und Ozon eine Rolle, da durch sie Hydrolyse und Oxidation ausgelöst werden. Als letztem exogenen Einfluss werden im Bericht die Folgen durch Kontakt mit menschlichem Schweiß erwähnt. Da dieser Milchsäure in signifikantem Ausmaß enthält, kommt es zu einer Zersetzung der Harzsäuren bei entsprechend geleimten Papieren, was die Azidität des Papiers erhöht und damit die Alterungsgeschwindigkeit.

Bei den Faserstoffkomponenten konnte kein klares Ranking zwischen Langfaser (Nadelholz) und Kurzfaser (Laubholz), auch nicht zwischen Sulfit- und Sulfatzellstoffen gefunden werden. Die Vergilbungsneigungen sind unterschiedlich, was aber oft auf die Bleichsequenzen (reduzierend und oxidierend) zurückgeführt werden könnte. Alkalische Behandlungen im Prozess wirken sich durchweg positiv auf die Alterungsbeständigkeit aus, da Oxidationsprodukte des Zellstoffs dadurch ausgewaschen werden. Bei Additiven wird deutlich, dass sich CaCO_3 als Füllstoff wegen des so eingetragenen Alkalipuffers verbessernd auf die Alterungsbeständigkeit auswirkt. Bei allen synthetischen Additiven ist prinzipiell von einer Hydrolysierbarkeit und Oxidierbarkeit auszugehen, was dann zumindest bei der Alterung der Hemicellulosen eine negative Rolle durch die Abbauprodukte spielen kann. Allerdings kann dieser Prozess sehr langsam ablaufen. Für natürliche Additive gilt ähnliches, wobei von Stärke bekannt ist, dass sie sehr gute Alterungseigenschaften haben kann (siehe Papiere aus der arabischen Epoche) und Gelatine (im tierischen Leim enthalten) ebenfalls einen Puffereffekt im Papier gegen Säure bietet. Auch die Ursprungsqualität des hergestellten Papiers spielt naturgemäß eine Rolle.

Mikrobiologische Zersetzung kann durch Bakterien oder Pilze stattfinden. Am häufigsten äußert sich ein Befall über Farbveränderungen, d. h. Flecken. Die vorhandenen Spezies sind nicht zwingend ein Befall wegen der Cellulose, eher sind Stärke oder Additive, teilweise einfach Schmutz die Nährböden. pH-Werte unter 7 begünstigen mikrobiologische Zersetzung, des Weiteren Temperaturen im Bereich 22 °C bis 32 °C. Schimmelwachstum wurde aber an anderen Materialien als Papier sogar noch knapp unter dem Gefrierpunkt festgestellt. Relative Feuchten ab 60 % begünstigen Schimmelwachstum, aber auch bei ca. 33 % konnte schon Schimmelwachstum auf Papier nachgewiesen werden.

Bezüglich der physikalischen Alterung werden Untersuchungen an künstlichen Polymeren vorgestellt. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollten helfen, die Alterungsprozesse bei natürlichen Polymeren besser zu verstehen. So ist bei amorphen Kunststoffen zu beobachten, dass die Fließpunkte (an dem die plastische Verformung beginnt) mit zunehmendem Alter steigen, die Bruchdehnung abnimmt, ebenso die Durchschlagfestigkeit. Auch das Kriechverhalten ändert sich, die Glasübergangtemperatur (bei der ein steiler Abfall des Elastizitätsmoduls zu verzeichnen ist) steigt, Versprödung ist somit ein physikalisches Indiz für Alterung.

Bezüglich Tinten und Druckfarben weisen die Autoren auf die Problematik des Ausblutens hin, welches schon in alten Tinten (ab etwa Christi Geburt) zum Gebrauch von Eisensulfat als Bindemittel geführt hat. Eisen als Übergangsmetall und Sulfat als Säurebildner sind beide unerwünscht. Säurebildner beschleunigen theoretisch die Alterung, allerdings wird aufgrund der geringen Mengen in den Tinten kein Effekt beobachtet.

Der Einfluss des Bedruckens auf die Papieralterung wird von (Le et al. 2000) beleuchtet, allerdings nur mit Inkjet- und Laserdruckern. Gemessen wurde an Inkjet-Papier, holzfreiem Kopierpapier und Recyclingkopierpapier. Alle Papiere erreichen die höchste Lebensdauerklasse nach DIN 6738. Die Inkjet-Farben wurden über Leitfähigkeit, pH-Wert, Oberflächenenergie und Lösungsmittel charakterisiert. Bedruckt wurden die Papiere vollflächig in Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz.

Alle Inkjet-Drucke vermindern die Papierfestigkeit, beim Laserdruck wird das nicht beobachtet. In der thermischen Alterung unterscheiden sich bedruckte und unbedruckte Papiere nicht, wohl aber bei der lichtinduzierten Alterung. Hier sind die unbedruckten Papiere recht stabil, die bedruckten erleiden deutliche Festigkeitsverluste.

Der Frage des Einflusses der Bleiche auf die Alterung bei CTMP gehen (Paulsson und Parkas 2001) auf dem 11. Symposium zur Holz- und Zellstoffchemie in Nizza (EFPG-Tappi 2001) nach. Jedoch wird unter Alterung lediglich die Vergilbung, somit die Stabilität der Bleiche verstanden. Interessant ist der Einsatz von Hilfsmitteln, die die Vergilbung verzögern, zumindest bei natürlicher Alterung (41 Wochen bei Tageslicht), nicht jedoch bei künstlicher Lichtalterung.

Auf der gleichen Tagung erörtern (Tylli und Forsskahl 2001), wie mit verschiedenen spektroskopischen Methoden der Einfluss der temperaturinduzierten Alterung erfasst werden kann. Zumindest bei Hochausbeutezellstoffen (ähnlich dem CTMP) konnten ab ca. 80 °C beginnende thermisch induzierte Reaktionen beobachtet werden.

Ebenfalls in Nizza berichten (Bond et al. 2001), dass ligningfreie Papiere auch nach 4 Jahren natürlicher Alterung bei Tageslicht kaum Verluste in der Helligkeit aufweisen. Dabei zeigten alkalische hergestellte Papiere weniger Helligkeitsverlust als sauer hergestellte und Papiere mit CaCO₃ weniger als solche ohne.

2.1.1.3 Untersuchungen zur Langzeitarchivierung

Eine wichtige Basis für den Umgang mit Papier und Empfehlungen für die Papierauswahl findet sich in einem Bericht von 1992 (Bund-Länder-Arbeitsgruppe Papierzerfall 1992). Unter anderem greift die Kultusministerkonferenz für ihren Beschluss 2138 darauf zurück (Kultusministerkonferenz 17.02.1995). Die Ursachen des Papierzerfalls in den Archiven werden endogen in den Inhaltsstoffen Lignin und Alaun bzw. Aluminiumsulfat gesehen. Beide Stoffe führen zu Säurebildung und kumulieren zu sich gegenseitig begünstigenden chemischen Vorgängen der Autooxidation, Oxidation und Hydrolyse. Beim Aluminiumsulfat resultiert dies aus dem Säureanteil des Salzes, nämlich Schwefelsäure. Beim Lignin ergibt sich dies aus der Bildung von organischen Säuren während der Alterung. Daraus folgen Stellungnahmen und Empfehlungen zu Anforderungen an Papier in Bibliotheken und Archiven (kein Recyclingpapier, nur Papier, welches die ISO 9706-Kriterien erfüllt) und an Schreibmaterialien

und Bürohilfsmittel im Verwaltungsbereich (Beteiligung an der Normungsarbeit zur Entwicklung geeigneter Kriterien wird empfohlen, die DIN 6738 zur Bestimmung von Lebensdauer-
klassen von Papier wird abgelehnt). Maßnahmen zur Lagerung und Verpackung sowie zur Schadensbeseitigung werden aufgeführt. Auch optoelektronische Speichermedien finden Erwähnung. Der Bericht endet mit einem Sondervotum des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. In diesem wird darauf verwiesen, dass der Bundesminister den Bericht nicht in allen Teilen mitträgt, insbesondere was den generellen Ausschluss von Recyclingpapier und die generelle Ablehnung der DIN 6738 angeht.

Behrens und seine Co-Autoren gehen in ihrem Abschlussbericht für die Kommission des Deutschen Bibliotheksinstituts für die Bestandserhaltung auf verschiedene Aspekte der Alterung und der Lagerung ein (Behrens et al. 1994). Ziel ihres Forschungsprojektes war die Ermittlung verbesserter Bedingungen für die Langzeitlagerung von Archivalien und Büchern. Vor allem der mehrfache Gebrauch von Dokumenten mit den daraus resultierenden Klimawechseln zwischen Lesesaal und Archiv und der mechanischen Beanspruchung beim Blättern und Lesen waren Gegenstand der Untersuchung. In der Stufe I des Abschlussberichtes wurde eine Literaturrecherche zur Alterung von Papier insbesondere unter Berücksichtigung der Sorption und Desorption von Wasser bei Klimawechseln durchgeführt. Daraus resultierte ein Untersuchungsplan zur Ermittlung optimaler Lagerungsbedingungen. In Stufe III werden diese Erkenntnisse in Empfehlungen für Neubauten von Archiven und sinnvolle Maßnahmen für bestehende Archive umgesetzt.

Im Stand des Wissens wird dargelegt, dass die Papieralterung exogenen und endogenen Einflüssen unterliegt. Die endogenen Einflüsse liegen im Papier, seiner Herstellweise und seiner Zusammensetzung begründet und können durch geeignete Papierauswahl beeinflusst werden. Im Wesentlichen wird die Cellulose, noch mehr die Hemicellulose durch Säuren langfristig hydrolysiert, was zu einem Festigkeitsverlust bis hin zu deutlicher Versprödung führt. Noch offensichtlicher als diese mechanischen Auswirkungen sind optische Veränderungen – das Papier vergilbt. Zwar beinträchtigt dies nach Meinung der Verfasser des Berichtes die Benutzbarkeit des Papiers als Datenträger nicht – im Gegenteil, die Autoren sehen dies als einen „Antiquitätswert“ (wörtliches Zitat) –, aber es ist ein Anzeichen für beginnende Schädigung im Papier durch diverse chemische Reaktionen.

Auch exogen kann Papier durch sich infolge von Luftverschmutzung bildende Säuren durch Hydrolyse geschädigt werden.

Der Bericht geht im Folgenden nicht auf endogene Maßnahmen wie z. B. die Alkalireserve im Papier ein, sondern betrachtet die Möglichkeit, chemische Reaktion durch Temperaturabsenkung zur verlangsamen bzw. durch Temperaturerhöhung zu beschleunigen. Für die Lagerung

erscheint demnach zunächst eine Temperatur von nahe oder unter dem Gefrierpunkt optimal, um chemische Reaktionen stark zu verlangsamen. Allerdings fiel schnell auf, dass beim Gebrauch solcher Papiere ein extremer Klimawechsel stattfinden würde, da Lesesäle bei 20 bis 23 °C und 40 bis 60 % relativer Luftfeuchte liegen. Ein solcher Wechsel bewirkt im Papier Wasseraufnahme mit einhergehender Quellung. Dies ist vor allem dann zu beachten, wenn ein Schriftgut aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt ist (z. B. Buchdeckel mit Einklebung), da diese unterschiedlich quellen und so Spannungen im Materialgefüge verursachen. Typische Schädigungen sind dann Wellungen oder Einrisse an Ecken und Gelenken. Bei gestrichenen Papieren kann sich ein Feuchtgleichgewicht aufgrund der geringen Porosität nur langsam einstellen, was zu Feuchtansammlung zwischen den Blättern und dadurch zu deren Verkleben führen kann.

Bei Versuchen kamen neun Papiere zur Anwendung, die zum einen bei konstanten Klimata unterschiedlicher Niveaus (sowohl Temperatur als auch relative Feuchte) gelagert wurden (was zur Ermittlung des optimalen Klimas für eine Lagerung und gleichzeitig als Referenz dienen sollte), zum anderen wurden die Papiere auch Klimawechseln unterzogen (bis hin zu 1.450 Schwankungszyklen!), um den Einfluss auf die Alterung zu untersuchen. Zur Bewertung wurden konventionelle Prüfwerte wie flächenbezogene Masse, Dicke, Bruchkraft und Bruchdehnung herangezogen. Auf die Messung der Durchreißfestigkeit wurde verzichtet, aber es wurde die Doppelfalzzahl mit dem MIT-Tester und die Veränderung der Bruchkraft durch eine Falzung nach Bansa untersucht. Die Messung nach Bansa fand nur an den an der Untersuchung beteiligten historischen Papieren statt (eines von 1668; eines von 1892, nicht entsäuert; das gleiche Papier von 1892, entsäuert) und ersetzte dort die Doppelfalzmessung. Beide Messverfahren sagen etwas über die Festigkeit eines Papiers im Gebrauch aus, da Papiere (insbesondere Geldscheine) oft während des Gebrauchs geknickt werden, dadurch aber ihre Gebrauchsfähigkeit nicht verlieren sollen. Auch werden Papiere häufig gefalzt (ohne Vorbereitung der Biegelinie, z. B. bei Zeitungsseiten) oder gefaltet (mit Vorbereitung der Biegelinie, z. B. bei Briefumschlägen) und sollen nach diesem Umformvorgang ebenfalls noch gebrauchsfähig bleiben.

Im Ergebnis ließen die bei unterschiedlichen, aber konstanten Klimata gelagerten Papiere keine Differenzierung in den Festigkeitsmesswerten erkennen. Ein optimaler Wert ließ sich also nicht herausarbeiten. Lediglich die Bruchdehnung ließ eine Tendenz zur Abnahme im Falle einer Kaltlagerung (bei 7 °C) erkennen, jedoch nicht sehr ausgeprägt.

Die einem Klimawechsel unterzogenen Papiere zeigten jedoch deutliche Abweichungen in der Festigkeitswerten. Die Bruchkraft stieg tendenziell (was mit einer Versprödung interpretiert

wurde), die Bruchdehnung nahm ab, was die gleiche Interpretation erlaubt. Auch die Doppelfalzzahl nahm ab, was ebenfalls auf eine Versprödung hindeutet.

Die Tendenzen waren bei den historischen und den zeitgenössischen Papieren gleich, die Niveaus der Messwerte jedoch unterschiedlich. Die historischen Papiere lagen deutlich unter den heutigen Papieren hinsichtlich ihrer Festigkeit. Gemessen wurden Reißlängen von 1,3 km (Papier von 1668), 2,3 km (nicht entsäuertes Papier von 1882) und 3,0 km (entsäuertes Papier), während die modernen Papiere Reißlängen zwischen 3,3 und 7,2 km aufzuweisen hatten. Bei den Bruchdehnungen lagen die alten und neuen Papiere dichter zusammen. Die neuen Papiere bewegten sich zwischen 1,0 und 2,3 %, das Hadernpapier von 1668 lag bei 1,5 %, die beiden anderen historischen Papiere bei 0,9 %. Jedoch zeigte sich, dass das entsäuerte Papier von 1892 dem nicht entsäuerten überlegen war. Auch die Abstufung zwischen den zeitgenössischen Papieren (Büttenpapier, Kopierpapier aus gebleichtem Zellstoff, Kopierpapier aus Altpapier, ungestrichenes und sauer hergestelltes SC-Papier [holzhaltig], gestrichenes und sauer hergestelltes LWC-Papier [holzhaltig] und gestrichenes und alkalisch hergestelltes Papier [holzfrei]) ist so, wie es von Fachleuten erwartet wurde, jedoch liegen alle zeitgenössischen Papiere über den Festigkeitswerten der historischen Papiere. Lediglich das entsäuerte Papier von 1892 reicht an den unteren Bereich der zeitgenössischen Papiere heran.

2.1.1.4 Besondere Betrachtung von Recyclingpapier

Des Öfteren stellt sich die Frage nach der Nutzbarkeit von Recyclingpapieren. Zwei australische Autoren (Bonham und Rolniczak 2006) testeten verschiedene Papiere, die Recyclingfasern enthalten, nach ISO 9706 auf Alterungsbeständigkeit (DIN EN ISO 9706) und nach DIN 6738 auf Lebensdauer (DIN 6738). Motivation ist, dass Papier gegenüber digitalen Medien Vorteile bei der Langzeitarchivierung hat, gleichzeitig aber unter Beachtung der Ressourcenschonung die gute Rezyklierbarkeit ausgenutzt werden sollte.

Bei der Gegenüberstellung der beiden Normen verweisen die Autoren auf den jeweils unterschiedlichen Ansatz. Die ISO 9706 will „keine bis nur geringe Veränderung“ des Papiers im vorliegenden Gebrauchsfall und stützt sich auf Papiereigenschaften und Papierzusammensetzung, die DIN 6738 schätzt über Lagerung bei erhöhter Temperatur und die dabei auftretenden Festigkeitsverluste die mechanische Lebensdauer des vorliegenden Papiers ab.

Zur Beurteilung der Verlässlichkeit der Ergebnisse wird auf umfangreiche ASTM-Studien verwiesen, in denen die Arrhenius-Regel, nach der chemische Prozesse bei erhöhter Temperatur schneller verlaufen, Anwendung und Bestätigung findet. Neben den auch in anderen Untersuchungen üblichen mechanischen Werten wie Bruchkraft, Bruchdehnung und Durchreißfestigkeit

wurde in den ASTM-Studien auch die Nullreißlänge und die Veränderung des durchschnittlichen Polymerisationsgrades der Cellulose gemessen. Erwähnt wird auch der in den Studien beobachtete Effekt, dass kompakt (etwa in einem Buch) gelagerte Papiere schneller altern als lose gelagerte, was mit einer langsameren Entweichung schädlich saurer Gase, die sich bei der Zersetzung von Papieradditiven bilden können, erklärt wird. Interessanterweise erwähnen die australischen Autoren die Zertifizierung der Archivtauglichkeit von Papieren durch die „National Archives of Australia“ zwar (National Archives of Australia 2019), gehen aber nicht auf die dort festgelegten Bedingungen ein.

Typischerweise scheitern Papiere mit Recyclingfasern am in der ISO 9706 festgelegten Grenzwert für die Kappazahl von 5. Dies liegt am nicht steuerbaren Ligningehalt im Altpapier. Die Kappazahl ist eine Maßzahl, die gleichwertig der bereits erwähnten Kupferzahl ein Maß für die Menge an Hydrolyseprodukten und oxidierbaren Bestandteilen im Faserstoff ist. Das Messverfahren zur Bestimmung der Kappazahl (ISO 302) bietet Vorteile gegenüber der Kupferzahl und hat darum diese im Laufe der Zeit abgelöst. Die Autoren untersuchen Papiere mit Mischungen aus Altpapier und Frischfaser. Das in der Untersuchung eingesetzte Altpapier entsprach keiner näher spezifizierten Sorte (etwa gemäß der europäischen Altpapiersortenliste (DIN EN 643) oder den US-amerikanischen Altpapierereinteilungen (ISRI 2013) ISRI specifications), aber es konnte bis 50 % Anteil am Kopierpapier ausmachen, ohne dass die Kappazahl von 5 überschritten wurde.

Bei der Untersuchung nach DIN 6738 betrachten die Autoren sehr intensiv die Konfidenzintervalle, um eine belastbare Aussage zu den jeweils erreichten Lebensdauerklassen zu treffen. Alle Faserstoffmischungen erreichen zumindest die Lebensdauerklasse LDK-12-80, die meisten sogar die LDK-24-80.

Des Weiteren wurden Farbveränderungen während der beschleunigten Alterung untersucht. Alle Papiere, auch die aus 100 % gebleichtem Zellstoff, zeigten über die Dauer eine Abnahme in der Helligkeit und eine Zunahme im Gelbwert. Gemessen wurde ohne UV-Anteil in der Beleuchtung. Bei der Messung mit UV-Anteil ließ sich die Abnahme des Weißgrads in Verbindung mit der Abnahme der Fluoreszenz (d. h. Abnahme der Wirksamkeit des optischen Aufhellers im Papier) bringen.

2.1.1.5 Prognosesicherheit von beschleunigten Alterungsverfahren

Der Frage der Prognosesicherheit, mit der von beschleunigter auf natürliche Alterung bei Cellulose geschlossen werden kann, geht (Zervos 2010) in seiner Literaturübersicht nach. Dabei bezieht er sich nicht nur auf die Erfordernisse der Verwaltungen, Bibliotheken und Archive an Papier, sondern auch auf Spezialanforderungen wie Isolierpapier für die elektrische Industrie. Hinzu kommt die in der Textilindustrie eingesetzte Cellulose als Baumwolle.

Es stellt sich die Frage, ob die bei einer natürlichen Alterung ablaufenden Prozesse identisch mit denen einer beschleunigten Alterung sind. Des Weiteren stellt sich die Frage nach den optimalen Bedingungen für beschleunigte Alterungsversuche.

Zervos greift auf drei Ansätze zurück:

1. Der Vergleich von Eigenschaften natürlich und beschleunigt gealterter Proben: Hier nennt er eine Studie aus dem Jahr 1928, durchgeführt vom National Bureau of Standards in den USA, bei der Hadernpapier und holzhaltiges Papier vermessen (pH-Wert, Azidität, α -Cellulosegehalt, Kupferzahl, Doppelfalz widerstand und Bruchkraft) und nach 4, 8, 22 und 26 Jahren natürlicher Alterung erneut vermessen wurde. Aus dem Vergleich kann auf eine Korrelation zwischen natürlicher und beschleunigter Alterung (72 h bei 100 °C) geschlossen werden, jedoch sind quantitative Voraussagen nicht möglich. Auch die von (Fellers 1989) zitierte Studie (siehe oben) an den auf einer Labormaschine hergestellten Papieren wird herangezogen. Ergänzend zu den dort gezogenen Schlüssen wird vermerkt, dass bei beschleunigter Alterung die Luftfeuchte nicht zu niedrig sein darf. Des Weiteren verweist er auf Arbeiten von Bansa aus den Jahren 1989, 1992 und 2002, die keine Korrelationen erlauben, was aber auf die große Variation der untersuchten Papiere zurückzuführen sein könnte. Als letztes erwähnt er eine Studie von Zou aus dem Jahr 1996, die anhand der Arrhenius-Gleichung eine Voraussage bezüglich des durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP) traf, was an über 22 Jahre natürlich gealterten Papieren verifiziert werden konnte.
2. Arrhenius-Studien: Aus Messungen der zeitlichen Änderung hauptsächlich des Doppelfalz widerstandes, der Helligkeit und des DP bei verschiedenen erhöhten Temperaturen wird auf den Verlauf bei Raumtemperatur geschlossen. Die Aussagen hierzu sind geteilt. Zum einen findet Zervos eine Reihe von Studien, die die Anwendbarkeit von Arrhenius-Untersuchungen befürworten. In vergleichenden Studien zwischen einem holzhaltigen und einem Hadernpapier wurde hingegen gezeigt, dass je nach untersuchter Eigenschaft, relativer Feuchte und Alterungstemperatur einmal sauerstoffabhängige und einmal sauerstoffunabhängige Reaktionen dominieren können, was zu falschen Schlüssen bei der Vorhersage von Eigenschaften führen kann. Weitere Studien zeigen, dass bei unterschiedlichen Bedingungen durchgeführte Alterungsprozesse nicht miteinander verglichen werden sollten, da die Aktivierungsenergie unterschiedlicher konkurrierender chemischer Reaktionen gleich sein kann.
3. Vergleich der Zerfallsprodukte: Dahinter steht die Idee, dass gleiche chemische Reaktionen zu gleichen chemischen Substanzen führen. Sind also natürliche und beschleunigte Alterung gleich, so sollte dies zu den gleichen Zerfallsprodukten führen. Hierauf

basieren Studien, aus denen geschlossen werden kann, dass die relative Feuchte während der künstlichen Alterung die Art der Zerfallsprodukte bestimmt, während die Temperatur die Schnelligkeit der Alterung bestimmt. Alterungsversuche im Bereich 60 bis 90 °C bei Luftfeuchten von 30 – 80 % führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Trockene Alterungsversuche können hingegen zu anderen Ergebnissen führen. Nach diesem Prinzip arbeitet auch eine Studie von Shahani, die im Rahmen eines Forschungsprogramms des ASTM in den USA durchgeführt wurde. Aus den Untersuchungen wurde abgeleitet, dass Alterungstests in versiegelten Behältern der natürlichen Alterung am nächsten kommen. Durch die Versiegelung können keine Stoffe entweichen, wodurch Autooxidationsprozesse infolge der Abbauprodukte bei der Alterung möglich werden. Hieraus resultierte ein neuer Standard für Alterungstests, der letztlich in die SIO 5630-5 überging. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass im Rahmen der Studie von Shahani ein Programm gestartet wurde, welches den 1. Ansatz verfolgt – 15 Bibliotheken bewahren Papierproben in Buchform auf und stellen diese für die nächsten 100 Jahre alle 10 Jahre für Tests zur Verfügung.

Auch bei Zervos finden sich die chemischen Gleichungen, die die Hydrolyse und die Oxidationsprozesse bei der Alterung darstellen. Zum Themengebiet Crosslinking liefert er die gleichen Erkenntnisse wie (Fellers 1989).

Bezüglich der Temperatur bei der beschleunigten Alterung konnte herausgearbeitet werden, dass ab 140 °C spätestens Pyrolyseeffekte eine signifikante Rolle spielen. Generell gilt die Tendenz, je höher die Temperatur, desto stärker weichen die Mechanismen des Zerfalls von der natürlichen Alterung ab. Umgekehrt gilt, je höher die Temperatur, desto schneller können Degradationsprozesse festgestellt werden. 80 bis 90 °C bei feuchter und 100 bzw. 105 °C bei trockener Alterung sind gängige Werte und finden sich auch in Normen wieder.

Zum Einfluss der relativen Feuchte bei der Alterung wird dargelegt, dass der eigentliche Einflussfaktor die Feuchte im Papier ist. Diese ist durch Sorptionsvorgänge bestimmt und hängt sowohl von der relativen Umgebungsfeuchte als auch von der Temperatur ab. Die Abhängigkeit zwischen Alterungsrate und Papierfeuchte wird in etwa als linear betrachtet, jedoch nicht von allen Autoren. Der starke Einfluss des Wassergehalts überrascht letztlich nicht, da Wasser bei der Säurehydrolyse eine essentielle Rolle spielt, durch Quellung zur Erhöhung der spezifischen Oberfläche beiträgt und durch seinen Einfluss auf den Glasübergangspunkt molekulare Bewegungen (von amorph nach kristallin) begünstigt.

Licht wird im Literaturüberblick bei Zervos eine größere Bedeutung beigemessen als von Fellers. Er zitiert eine ganze Reihe von Arbeiten, die belegen, dass durch Photooxidation Autooxidationsprozesse und in Folge auch hydrolytische Prozesse induziert werden. Cellulose und

Hemicellulose absorbieren dabei eher im UV-Bereich unter 200 nm Wellenlänge, Lignin auch im sichtbaren Bereich.

Dargestellt werden zudem die kinetischen Studien und Gleichungen, über die mit Hilfe des Kehrwertes des DP der Prozentsatz gespaltener glykosidischer Bindungen in der Cellulose zumindest für frühe Stadien der Alterung vorherbestimmt werden kann.

Bei der Bewertung weiterer Einflüsse auf die Alterung von Cellulose streift Zervos kurz die diversen Stufen der Papierherstellung, die alle in gewissem Maße die Faser vorschädigen und den Anteil oxidierter Cellulose erhöhen. Ambivalent sieht er den Einfluss von Lignin. Dass Papiere mit Ligningehalt bei beschleunigten Alterungsversuchen schneller degradieren, sieht er als erwiesen an. Aber bei moderaten Lagerungsbedingungen hält er die Degradationsrate von Lignin für akzeptabel. Dafür hilft die Präsenz von Lignin, biologischen Befall (Pilze, Bakterien und Schädlinge) zu minimieren.

Ein weiterer Literaturüberblick findet sich bei (Marie Cristina Area et al. 2011). Die Autorinnen gehen stärker auf die prozentuale Zusammensetzung an Lignin, Hemicellulose und Cellulose bei Papierfasern ein als andere Autoren und legen die verschiedenen Zuckermonomertypen sowie typische chemische Gruppen in den Faserbestandteilen dar. Neben den auch bei anderen Autoren erwähnten Alterungsprozessen und ihren Auslösern finden sich in diesem Überblick auch Aussagen zum alkalisch induzierten Abbau und warum der pH-Wert nicht zu hoch sein darf.

Deutlich mehr als bei anderen Autoren wird zum biologischen Abbau des Papiers gesagt. In Bibliotheken und Archiven tropischer und subtropischer Gegenden ist dies die am häufigsten anzutreffende Ursache für Dokumentenschäden. Vor allem Schimmel und Insektenbefall sind zu verzeichnen und können mit Ethylenoxid oder Bestrahlung bekämpft werden. Auch andere Mittel wurden mit Erfolg angewandt, zunächst ohne Beeinträchtigung der Papiereigenschaften (*Anmerkung: Es fehlen Aussagen zur Auswirkung auf die Alterungsbeständigkeit nach einer Dekontamination*). Biologisch bedingte Schäden sind kaum rückgängig zu machen. Eventuell sich dennoch ergebende Ansätze mit cellulosebildenden Bakterien sind noch im Forschungsstadium.

Auch die Rolle von Lignin wird neu bewertet. Unbestritten finden Degradationsprozesse auch im Ligninpolymer statt. Ein Teil dieser Prozesse wird in Form von Vergilbung offensichtlich. Jedoch zeigen Untersuchungen, dass Vergilbung nicht als Indikator für Faserschädigung genommen werden darf. Ligningehalte zwischen 0 und 28 % (der natürliche Ligningehalt in Papierfasern liegt zwischen 20 und 40 %) lassen keine kritischen Festigkeitsverluste während der Alterung erkennen. Die von Area zitierten Autoren Schmidt, Rye und Gurganul finden bei Lignin antioxidierende Wirkung, was die oxidative und autooxidative Alterung von Papierfasern

hemmen könnte (Schmidt et al. 1995). Dies findet seinen Niederschlag in einer kanadischen Norm ((CAN/CGSB-9.70-2016 2016), aus dieser ging die (ISO 20494) hervor). Diese kanadische Norm lässt 1 % Ligningehalt in Papieren zu (die Limitierung erfolgt ausdrücklich nur, um die Vergilbung als optischen Mangel zu vermeiden, entspricht aber den Vorgaben der Normen, die eine maximale Kappazahl vorschreiben) und geht von einer Haltbarkeit der Papiere über mehrere hundert Jahre aus. Auch (Allscher und Ceynowa 2018) und (Kriese 2019) weisen darauf hin, dass die Festigkeit von Lignin auch nach Alterung besser ist als allgemein in der Literatur unterstellt und dass hier noch Forschungsbedarf besteht.

Bei der Betrachtung der Methoden zur beschleunigten Alterung weisen die Autorinnen auf Unterschiede hin, die sich bei der Alterung loser Blätter oder Blattstapel ergeben. In Stapeln altern Papiere schneller, wobei die Mitte stärker betroffen ist als der Rand, was damit begründet wird, dass Abbauprodukte entstehen, die zu Autooxidation führen, wenn sie nicht entweichen können (Baranski 2002). Ergänzend hierzu sei ein Artikel (Bülow et al. 2000) aufgeführt, der die Migration der beim Abbau entstehenden flüchtigen Verbindungen über mechanische und optische Eigenschaften der Papiere an verschiedenen Positionen im Stapel nachverfolgt.

Die Analyse der Alterung mit mechanischen Testmethoden sind oft zerstörende Prüfungen. In einer Tabelle werden eine Fülle von modernen Analysemethoden gezeigt (Spektroskopische Methoden, Chromatographie, SEM, Lumineszenz- und Fluoreszenzmethoden etc.), die neben den physikalischen Aussagen auch chemische Aussagen zu den Proben zulassen. Teilweise können diese Methoden auch ohne Zerstörung der Proben angewandt werden.

Auf die Nützlichkeit moderner Analysemethoden gehen auch (Cocca et al. 2011) ein. Sie untersuchen reine Cellulose, die zu Filterpapier verarbeitet wurde. Neben der Viskosimetrie zur Beurteilung des Celluloseabbaugrades werden auch FTIR und Röntgenstreuungsmessungen (WAXS) eingesetzt. Parallel wurden auch Spannungs-Dehnungskurven gemessen und die daraus erhaltenen Parameter (Bruchkraft, E-Modul und Bruchdehnung) mit dem Abbaugrad der Cellulose korreliert.

Oft stellt sich die Frage, wie aus dem Depolymerisationsgrad auf den Alterungszustand der Cellulose geschlossen werden kann. Eine Antwort geben (Chiriu et al. 2018), indem sie alte Papiere aus einer Zeitspanne zwischen dem 15. Und dem 21. Jahrhundert mittels Raman-Spektroskopie untersuchen. Sie messen die prozentuale Abnahme intermonomerer C-O-C Bindungen im Vergleich zu einem Referenzpapier aus dem Jahr 2017 und tragen die Daten über dem bekannten Alter der Papiere auf. Es findet sich hohe Übereinstimmung, d. h. gleich alte Papiere haben auch eine gleiche prozentuale Abnahme der C-O-C Bindungen im Vergleich zur Referenz. Als Nebeneffekt wird beobachtet, dass der Gradient der prozentualen Abnahme mit steigendem Alter der Papiere signifikant sinkt.

Neben der bisher betrachteten beschleunigten Alterung durch Temperatur und Feuchte erheben (Tétreault et al. 2019) den Anspruch, den Einfluss einzelner Parameter auf die Alterung simulieren zu wollen. Als Maß der Alterung wird die Verminderung des DP berechnet, die theoretischen Prognosen werden mit Messdaten an Hadernpapier überprüft. Basis sind Arrhenius-Studien. Letztendlich können gut Voraussagen über den Abbau des Polymerisationsgrades getroffen werden, solange nur ein Parameter variiert wird. Multiparametervariation überfordern das Modell. Zu den untersuchten Parametern gehören neben Temperatur und relativer Feuchte auch gasförmige Verschmutzung (NO₂ und andere säurebildende Gase).

Generell lässt sich zusammenfassend aus den Untersuchungen der verschiedenen Autoren schließen, dass bei genauer Kenntnis aller Randbedingungen während der Lagerung sehr gute Voraussagen zum Alterungsverhalten von Papierfasern getroffen werden können, wenn auch der jeweilige Einfluss der im Papier zusätzlich vorhandenen Komponenten bekannt und die Anzahl der Stoffe im Papier nur klein ist. Je komplexer das Papier in seinem Aufbau und seiner Zusammensetzung ist, desto mehr Unsicherheiten müssen bei einer Prognose des langfristigen Alterungsverhaltens in Kauf genommen werden. Jedoch kann aus den Alterungsversuchen eine qualifizierte Abschätzung des Alterungsverhaltens getroffen werden.

2.1.2 Tinten und Druckfarben

In der Gesamtheit eines Dokumentes kommt dem bisher betrachteten Papier im Wesentlichen die Funktion des Trägers zu, auf welchen Information aufgebracht wird und der diese Information solange wie möglich erhalten soll. Die Art, wie die Information übertragen wird, spielt naturgemäß eine ebenso große Rolle.

Bei Papier wird die Information durch Druckfarben und Tinten dargestellt. Andere Möglichkeiten wie Wasserzeichen oder Prägeverfahren spielen eine untergeordnete und für das Projekt Labest Papier irrelevante Rolle.

Klassisch wird unterschieden in konventionelle Druckverfahren (Hochdruck, Tiefdruck, Flach- bzw. Offsetdruck und Siebdruck mit jeweils speziellen Unterverfahren) und digitale Druckverfahren (Elektrofotografie bzw. Kopierer, Thermodruck und Inkjetdruck, wiederum mit jeweils speziellen Untergruppen), auch Non-Impact-Verfahren genannt (Blechsmidt 2013).

Tieferen Einblick in die Druckverfahren mit ihren Vorstufen, den Anforderungen an die jeweils an das Druckverfahren angepassten Druckfarben und die grundsätzlichen Formulierungen solcher Farben findet man bei (Kipphan 2000). Hinzu kommt jedoch, dass die Druckfarbenlieferanten versuchen, sich durch Preis und/oder Qualität auf dem Markt zu behaupten, was zum Einsatz von Additiven führt. Die genauen Druckfarbenformulierungen sind daher spezielle Rezepturen, die von den Farblieferanten nicht öffentlich gemacht werden.

Vereinfacht haben nach (Target 2020) Druckfarben vier wichtige Bestandteile: das Farbpigment, das Bindemittel, das Dispergiermittel und das Lösungsmittel. Damit werden Farbe, Farbechtheit, Farbhaftung auf dem Papier und Farbübertragung gesteuert.

Manchmal kommen einzelne Additive ungewollt ins Rampenlicht der Öffentlichkeit (z. B. der Fotoinitiator ITX, der in Lebensmitteln nachgewiesen wurde (Deutsche Umwelthilfe e.V. 2020)), geraten ins Visier von Fachleuten (z. B. der Flüssigtoner Indigo (INGEDE 2020), der die Deinkbarkeit beeinträchtigt) oder werden in internen Kreise diskutiert (z. B., ob die Vernetzung UV-härtender Farben abgeschlossen ist oder nicht (Preston et al. 2006); die Frage stellt sich vor allem nach der teilweisen Umstellung von quecksilberbasierten UV-Strahlern auf LED-Technik). Gerade letzteres zeigt die Bedeutung für die Alterung von Papier-Druckerzeugnissen auf, denn bei unvollständiger Härtung können Radikale übrigbleiben, die wiederum Oxidationsreaktionen initiieren, von gesundheitlichen Auswirkungen ganz zu schweigen.

Zwar ist davon auszugehen, dass in den Archiven des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung auch Handbücher, technische Zeichnungen, Broschüren etc. gelagert werden, die in den konventionellen Druckverfahren bedruckt worden sind, jedoch ist stark anzunehmen, dass es sich bei den Beständen im Wesentlichen um Schriften, Drucke und Kopien handelt, wie sie von der Norm (DIN ISO 11798) erfasst werden. Darum soll im Folgenden schwerpunktmäßig von dieser Art von Dokumenten ausgegangen werden. Auf andere Dokumente treffen die Aussagen sinngemäß und anwendungsbezogen jedoch ebenso zu. Da die Erstfassung der Norm aus dem Jahr 1999 stammt, werden alte Büroschreibtechniken wie Schreibmaschine, Kohledurchschlag oder Matrizendrucker nicht miterfasst, sollten aber sinngemäß genauso beurteilt werden.

Die wichtigen Punkte sind:

- Farbintensität und Aussehen der Schriftbilder
- Lichtechtheit
- Wasserbeständigkeit
- Abdruckbeständigkeit (Abklatsch)
- Abriebbeständigkeit
- Wärmebeständigkeit
- Einfluss der Beschriftung auf die Papierfestigkeit.

Ausdrücklich nicht enthalten ist die Fälschungssicherheit, wie etwa für Bankunterlagen.

Diese unterscheidet sich nochmals von der Dokumentenechtheit, bei der es um Dokumente geht, die zur Beweisführung dienen. Tinten für letzteres sind mit der (DIN ISO 12757-2) beschrieben. Zusätzlich zu den Punkten der DIN ISO 11798 kommen hinzu:

- Radierfestigkeit
- Ethanolbeständigkeit
- Salzsäurebeständigkeit
- Ammoniakbeständigkeit
- Bleichbeständigkeit
- Wasserbeständigkeit.

Der Punkt „Abriebbeständigkeit“ der DIN ISO 11798 wird für Druck- und Büropapier noch über die (DIN EN 12283) zur Bestimmung der Tonerhaftung ergänzt.

Im TAGA Journal (Technical Association of the Graphic Arts 2006) veröffentlichten (Lindquist et al. 2006) Forschungen zur Beurteilung des Schriftbildes bei Inkjet-Drucken. Spreizung und Penetration der Farbe konnten mit hochauflösenden Messtechniken analysiert und in Beziehung zu Papiereigenschaften, Tinte und Druckkopf gesetzt werden. Neben lösemittelbasierten Tinten waren auch ölbasierte und UV-härtende Farben mit in der Testreihe. Die Güte des Schriftbilds konnte dabei nicht allein dem Papier, der Tinte oder dem Druckkopf zugeschrieben werden, es kam immer auf die Abstimmung zwischen allen dreien an. Aussagen zur Alterung wurden nicht gemacht.

Ebenfalls mit der Qualität des Druckbildes beschäftigen sich (Gidlof et al. 2006). Papiereigenschaften wie Glanz, Oberflächentopografie, Weiße und Opazität wurden zusammen mit Trocken- und Flüssigtonern und verschiedenen Druckertypen getestet. Insbesondere die Qualität gedruckter Farbbilder wurde durch ein von mehreren Personen durchgeführtes Ranking beurteilt. Dadurch stellte sich heraus, dass guter Kontrast generell zu besserer Beurteilung führte. Glanzvariationen störte die beurteilenden Personen schon weniger, Farbvariation gar nicht. Auch hier wurden keine Alterungsversuche unternommen.

Zum Druckbild nehmen auch (Krainer et al. 2020) Stellung. Dabei kommen Tinten für High Speed Inkjet zur Anwendung. Die Farbpenetration wurde gemessen und mit anderen Messgrößen wie Kontaktwinkel, Absorptions- und Penetrationstests verglichen. Für geleimte Papiere konnten gute Korrelationen ermittelt werden, bei anderen Papieren konnte die Penetrationstiefe nicht vorhergesagt werden, teilweise trat sogar Durchschlagen auf. Auch hier sind weder zur Alterung noch zu den weiteren Punkte der ISO 11798 Hinweise zu finden.

Eine umfassende Arbeit zur Beurteilung von Tinte und Schreibmitteln findet sich in (Siller-Grabenstein 1989). Ziel der Dissertation ist vor allem, einen Beitrag zur Erhaltung auch der Schriften zu leisten, wenn Papierdokumente wegen drohenden Zerfalls entsäuert werden müssen. Dazu werden verschiedene Maßnahmen zur Vorfixierung der Beschriftungen beschrieben. Für das vorliegende Projekt Labest Papier dürften aber vor allem die Ausführungen zu den Schreibmitteln von Nutzen werden. Da sich die Dissertation auf die Unterstützung bei der Restaurierung alter Dokumente bezieht, finden sich Angaben zu Trockenschreibmitteln (Bleistift, Farb- und Kopierstifte), Nassschreibmitteln (Füllertinten, Faser- und Filzschreiber), Kugelschreiberpasten, Tuschen, Stempelfarben, Schreibmaschinenbändern und Kohlepapier, Matrizendruckern (Hektographie bzw. Ormig-Kopie, „Spiritusdrucker“), Lichtpausverfahren bis hin zu den moderneren Verfahren wie Thermodrucken und Inkjet. Zwar wird die jeweilige Zusammensetzung nur generell beschrieben, aber in den Versuchen zum Verhalten der Tinten finden sich jeweils aus allen Kategorien Beispiele, so dass ein guter Einblick in das Verhalten der Beschriftungstoffe gewonnen werden kann.

Zur Alterung von Tinte finden sich Artikel aus dem Bereich der Forensik. (Cantu 1988). Der Autor verweist auf die große Anzahl an Forschung im Bereich der Papieralterung, der nur wenig auf Seiten der Tinten- und Druckfarbenalterung entgegensteht. Jedoch stellt sich diese Frage des Öfteren bei der gerichtlichen Einordnung des Alters von Dokumenten. Die Tintenalterung interagiert jedoch mit der Papieralterung, so dass immer beides betrachtet werden muss. Die Alterungscharakteristika von Tinten ergeben sich aus der Verflüchtigung ursprünglich vorhandener Lösungsmittel, einer Veränderung der Extraktionseffizienz in schwachen Lösungsmitteln und in Veränderung der IR-Charakteristika. Beschleunigte Alterung kann dabei gut zur Beurteilung natürlicher Alterung herangezogen werden.

Auch die Arbeiten von Céline Weyermann ((Weyermann 2005) und (Weyermann und Spengler 2008)) haben die Datierung von Dokumenten zum Hintergrund. Die Arbeit von Cantu wird durch moderne Untersuchungsmittel wie LDI-MS (Laser-Desorptions-/Ionisations-Massenspektrometrie) für die Untersuchung der Farbstoffe und GC/MS (Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie) für die Lösungsmittel ergänzt. Die Dissertation von 2005 zeigt, wie anhand künstlicher Alterung die natürliche Alterung der Tinte nachvollzogen werden kann, wobei der Bedruckstoff Papier ausreichend Berücksichtigung findet. Letztlich sind die gefundenen Aussagen zur Alterung der Kugelschreiberpaste so belastbar, dass die Reihenfolge zweier sich kreuzender Kugelschreiberlinien auf einem Dokument zur Echtheitsbestimmung herangezogen werden konnte. In der weiterführenden Arbeit aus 2008 wird gezeigt, wie präzise aus der künstlichen Alterung auf die natürliche gealterte Tinte im Verbund mit dem Bedruckwerkstoff Papier geschlossen werden kann.

(Freidenfelds et al. 2016) verfolgen, ebenfalls vor einem forensischen Hintergrund, eine andere Fragestellung. Wegen der guten Übereinstimmung und Vorhersagbarkeit der Eigenschaften aus natürlich und künstlich gealterten Kugelschreibertinten suchen sie nach Anzeichen, an denen eine künstlich durchgeführte Alterung erkannt wird. Dadurch soll ausgeschlossen werden, dass nachträglich hinzugefügte Schriftsätze durch künstliche Alterung einem Originaldokument angepasst wurden. Durch Einsatz der HPLC (High Performance Liquid Chromatography) zusätzlich zu den von Weyermann schon aufgelisteten Methoden können Abnormalitäten zwischen natürlich und künstlich gealterten Schriften aufgedeckt werden, wenn denn die künstliche Alterung als sehr aggressiv gegenüber der natürlichen einzustufen ist.

Abgesehen von ausbleichenden Thermodrucken wie auf Kassenzetteln oder schlechten Kopien, die zu Zeiten schlechter Tonerhaftung gemacht wurden, ist das Verblässen von Schrift anscheinend kein dominierendes Problem. Literaturhinweise dazu finden sich weniger vor dem Hintergrund des Alterns, sondern eher als Nebeneffekt der Vergilbung oder als ungewollte Begleiterscheinung bei der Behandlung von Papier etwa mit dem Massenentsäuerungsverfahren (Anders 2009).

Bekannt ist dem Fachgebiet PMV dieses Thema durch einen Prüfauftrag einer Bank, die die vom Lieferanten versprochene Lesbarkeit von Kontoauszügen, die mit Thermodruck erstellt wurden, überprüfen lassen wollte. Verlangt ist eine Lesbarkeit von 12 Jahren, was der Aufbewahrungsfrist von Geschäftsdokumenten plus eine Sicherheit von 2 Jahren entspricht. Es gibt dazu keine genormte Prüfvorschrift, die Hersteller solcher Papiere bieten 4 Kategorien an (von 1 für die schnell bleichenden Kassenzettel bis 4 für Kontoauszüge). Untersuchungen dazu müssen mit selbst gewählten Randbedingungen arbeiten.

Die ansonsten moderate Betrachtung des Ausbleichens von Schrift mag daran liegen, dass die verwendeten Tinten bzw. Druckfarben per se nicht ausbleichen. Z. B. ist seit der Antike das bevorzugte Pigment für Schwarz Ruß, welches aus reinem Kohlenstoff besteht, der sehr gute Alterungseigenschaften hat.

Farben und deren Ausbleichen ist vor allem beim Färben von Textilien von Bedeutung, da eine unzureichende Lichtechtheit oder ein Ausbluten der Farbe bei einer Wäsche vom Verbraucher sofort bemerkt und nicht toleriert wird.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang die Messung der Lichtechtheit nach (DIN ISO 12040). Bekannt ist dies auch als Lichtechtheit nach der Wollskala und ist aus der Textilnorm abgeleitet. Eine Lichtechtheit von 8 ist die höchste mögliche Stufe, 4 bis 5 sind als gut einzustufen, 1-2 sind Farben, die recht schnell ausbleichen.

2.2 Bewertung DIN EN ISO 9706, „Rules for use of 'Archival Quality' certification trademark" und ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009)

Es existiert eine Fülle von Normen, Vorschriften und Anforderungen, die sich mit dem Thema Erhalt von Information beschäftigen. Einen guten Einstieg bilden die beiden DIN-Taschenbücher „Information und Dokumentation“ (DIN-Taschenbuch 343 2018) sowie „Bestandserhaltung in Archiven und Bibliotheken“ (Allscher und Haberditzl 2019). In beiden Werken werden nicht nur die Aspekte der Archivierung auf Papier, sondern auch des Mikrofilms und der digitalen Speicherung behandelt.

2.2.1 Begriffe

Wichtige Begriffe werden in der DIN EN 15898 definiert. Einige hier relevante (zitiert nach (Allscher und Haberditzl 2019)) sind folgende (in Klammern die englischen und französischen Begriffe):

-
1. Alterung (ageing, viellissement): natürliche Veränderung im Laufe der Zeit
 2. Veränderung (alteration, modification): Änderung des Erhaltungszustands, egal, ob beabsichtigt oder nachteilig oder das jeweilige Gegenteil
 3. Schaden, Schädigung (damage, altération bzw. dégât und weitere): unvorteilhafte Veränderung
 4. Defekt (defect, défaut bzw. malfaçon): Beeinträchtigung des Objekts durch Herstellung, Beschaffenheit oder Konzeption
 5. Abbau, Verfall, Zerfall (deterioration, dégradation bzw. détérioration): unbeabsichtigte Veränderung, die die Stabilität mindert
 6. Stabilität (stability, stabilité): Fähigkeit physischer, chemischer oder biologischer Veränderung zu widerstehen *Anmerkung: Dies entspricht der Definition von „Alterungsbeständigkeit“ der ISO 9706 (DIN EN ISO 9706), erweitert um die biologische Dimension.*
 7. Strukturelle Stabilität (structural stability, stabilité structurelle): Fähigkeit eines Objektes, unter Einwirkung von Kräften im Gleichgewicht zu bleiben, ohne seine mechanische Festigkeit zu verlieren
 8. Haltbarkeit (durability, durabilité): Fähigkeit, Abnutzungswirkungen unter Belastungsbedingungen zu widerstehen
 9. Kompatibilität (compatibility, compatibilité): Ausmaß, in dem ein Material zusammen mit anderen Materialien verwendet werden kann, ohne die Stabilität zu gefährden
 10. Integrität (integrity, intégrité): Ausmaß an physischer oder ideeller Vollständigkeit eines Objektes

Cellulose und Hemicellulosen sind Polysaccharide und damit unter den Polymeren einzuordnen. (DIN 50035) definiert hierzu ebenfalls Begriffe zur Alterung, gedacht für polymere Kunststoffe. Dabei werden die Ursachen und Vorgänge der Alterung eingeordnet, Alterungserscheinungen benannt und Begriffe zum Alterungsschutz aufgeführt.

Nicht definiert ist in diesem Zusammenhang der Begriff dauerhafte „Unversehrtheit“, wie er in der Ausschreibung des Projektes aufgeführt ist. Die Bedeutung wird im Wörterbuch mit „unverletzt“ und „unbeschädigt“ angegeben, als Synonyme werden „funktionsfähig“, „mängelfrei“ und „intakt“ (DWDS - Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache 2020) angegeben. Im juristischen Zusammenhang taucht der Begriff meist im Zusammenhang mit „körperlicher Unversehrtheit“ und ist definiert als Schutz der Gesundheit im biologisch-physiologischen Bereich (Integrität der körperlichen Substanz) und als Schutz der Gesundheit in psychischem Bereich vom Zeitpunkt ihrer Entstehung bis zum Eintritt des Todes (Quelle: Beck-OK GG, Art. 2, Rdn. 62; BVerfGE 56, 54, 73 u. 74; BVerfGE 115, 118, 139, zitiert nach (iurNetwork UG 2020)).

Sucht man in anderen Sprachen, so finden sich im Englischen die Worte integrity, intactness und inviolability (Reverso Context - englisch 2020), wobei letzteres am stärksten mit dem deutschen Begriff der körperlichen Unversehrtheit einhergeht, während intactness sich auf „intakt“ im Sinne von „nicht kaputt, funktionstüchtig“ bezieht. Integrity hingegen scheint im Ausmaß seiner Wortbedeutung das zu meinen, was mit Unversehrtheit im Zusammenhang mit Dokumenten gemeint ist, nämlich das keine wesentlichen Veränderungen, die die intendierte Nutzung des Gegenstandes beeinträchtigen, erlaubt sind.

Das französische intégrité stützt diese Auffassung, da es im Ausmaß seiner Wortbedeutung dem englischen integrity entspricht (Reverso Context - französisch 2020), während das Synonym intangibilité auch die körperliche Unversehrtheit meint, darüber hinaus aber juristisch definiert, dass keine Modifikation vorgenommen werden oder stattfinden darf, somit eine Unveränderlichkeit gegeben sein muss. (Braudo 2020)

Damit scheint der in der Norm DIN EN 15898 definierte Begriff der Integrität eines Objektes dem am nächsten zu kommen, was unter Unversehrtheit zu verstehen ist.

Bei der im Folgenden durchgeführten Betrachtung der verschiedenen Normen ist es wichtig, unter welchen Gesichtspunkten der jeweilige Standard entstanden ist. So ist von „permanence“ (deutscher Begriff: „Alterungsbeständigkeit“) die Rede (DIN EN ISO 9706) und meint die Fähigkeit, über lange Zeiträume chemisch und physikalisch stabil zu bleiben. Des Weiteren wird „paper stability“ (ISO 20494) als Fähigkeit des Papiers definiert, seine Funktionalität bei normalem Gebrauch und normaler Lagerung zu erhalten. Da es sich um eine nicht von DIN übernommene ISO-Norm handelt, ist dem kein adäquater deutscher Begriff zugeordnet. Allerdings baut die ISO 20494 auf der deutschen Norm zur Bestimmung von Lebensdauerklassen (DIN 6738) auf. Dabei geht es um den Erhalt der Papierfestigkeit über längere Zeiträume.

In der Literatur auch gebräuchlich ist der Term „durability“. Er wird in der ISO-Norm „Requirements for permanance and durability“ (ISO 11108) definiert und meint die Resilienz eines Papier gegen Verschleiß und Einreißen während des Gebrauchs.

2.2.2 DIN EN ISO 9706

Generell kann man zwei Ansätze in der Normung erkennen: Vorschreiben der stofflichen Zusammensetzung des Papiers oder Vorschreiben der maximal erlaubten Änderung von Papiereigenschaften durch beschleunigte Alterung.

Der erste Ansatz geht von einem Grundzustand des Papiers aus, dem ausreichende Reserve gegen natürliche Alterung bei sachgemäßer Lagerung unterstellt wird. Bekanntester Vertreter dieses Ansatzes ist die ISO 9706 (*Anmerkung: In diesem Bericht wird als offizielles Zitat die*

(DIN EN ISO 9706) angeführt. In Zweifelsfällen ist jedoch die englische Version der ISO 9706 gültig. Diese Norm steht aktuell zur Revision an).

Die Norm verlangt eine Kappazahl von < 5 , was praktisch Freiheit von Lignin bedeutet. Das Papier muss beim Kaltwasserextrakt einen alkalischen Charakter zwischen 7,5 bis 10 vorweisen, was durch Herstellung im neutralen oder leicht alkalischen Bereich erreicht wird. Zudem soll im Papier Calciumcarbonat enthalten sein (mindestens 2 %), was als „Alkalireserve“ bezeichnet wird. Da die Cellulose des Papiers bei üblichen Umwelteinflüssen durch Säure angegriffen wird, kann diese Alkalireserve Säuren abpuffern und ihnen so die Wirkung nehmen. Zudem muss das Papier mindestens 25 g/m^2 wiegen, darf nicht gestrichen sein und soll eine Mindestfestigkeit im Durchreißversuch von 350 mN haben (in einem späteren Kapitel sind die einzelnen Parameter über die Normen hinweg vergleichend in Tabelle 1 zusammengestellt).



Abbildung 1 Konformitätssymbol nach (DIN EN ISO 9706)

Die ISO 9706 offeriert ein Permanence-Label, welches laut normativem Anhang B eine Konformitätsbestätigung beinhaltet, wenn alle Parameter eingehalten werden (Abbildung 1).

Weitere Normen lehnen sich stark an die eben genannte an, wobei jedoch manchmal schärfere Grenzwerte gezogen oder zusätzliche Messungen vorgeschrieben werden. Ein besonderer Fall in dieser Reihe ist die (ISO 11108), die in dieser Fassung heute noch gültig ist. Zuletzt wurde sie in Italien im Jahr 2011 von der dortige Normungsstelle UNI als nationale Norm übernommen, in der Literatur wird sie kaum zitiert. In Abweichung zur ISO 9706 wird als Faserrohstoff Hadern vorgeschrieben, kleinere Mengen von Chemiezellstoff werden erlaubt, müssen aber genannt werden. Zusätzlich zu dem in der ISO 9706 angegebenen Mindestwert für die Durchreißfestigkeit wird noch ein Wert für den Doppelfalzwiderstand vorgeschrieben.

In diese Reihe gehört noch die italienische Norm (UNI 10332) für Papiere mit „höchsten“ Ansprüchen an die Alterungsbeständigkeit. Diese geht noch ein Stück über die ISO 11108 hinaus, indem sie einen Mindestpolymerisationsgrad vorschreibt (wodurch nur reine Hadernpapiere in Frage kommen, da in Holzfasern ein Gemisch aus Cellulose und Hemicellulose vorliegt und somit kein DP bestimmt werden kann), einen maximalen Gehalt an Kupfer und Eisen sowie einen prozentualen Mindestrestwert nach einer beschleunigten Alterung gemäß

ISO 5630-3 für die Festigkeitswerte und für den ISO-Weißgrad. Diese Norm hat in der Literatur und der praktischen Anwendung keine Bedeutung.

2.2.3 „Rules for use of `Archival Quality` certification trademark”

Das Dokument „Rules for use of ‚Archival Quality‘ certification trademark“ wurde vom „*National Archives of Australia*“ herausgegeben (National Archives of Australia 2019). Es legt die Kriterien fest, nach denen die Behörde ein spezielles Archivierbarkeitszeichen vergibt, eine stilisierte Kombination aus dem Buchstaben Q (Quality) und Unendlich:



Abbildung 2 „Archival Quality“ Trademark (National Archives of Australia 2019)

Das Dokument beschreibt die Form, wie das Zeichen genutzt werden darf und auch die Eigenschaften, welche ein Produkt (nicht nur Papier!) haben muss, um das Archivierbarkeitszeichen zu erhalten. Die Tests dafür müssen von einer von der National Association of Testing Authorities (NATA) akkreditierten Stelle durchgeführt werden.

Im Folgenden führt das australische Dokument zunächst das Vorgehen bei Papier, Karton und Wellpappe weiter aus. Den Tests liegen Vorschriften nach ASTM, TAPPI und ANSI zugrunde. Kriterien sind chemische Stabilität über einen langen Zeitraum, keine nachteiligen Auswirkungen auf benachbart gelagertes Material und kein signifikanter Festigkeitsverlust trotz regelmäßigen Gebrauchs über einen langen Periodenzeitraum. Es wird hervorgehoben, dass andere für den Gebrauch nötige Qualitätseigenschaften eines Papiers (z. B. die Nutzbarkeit in Kopierern) nicht Gegenstand des Dokumentes sind.

Als erstes wird Kopierpapier betrachtet. Zur sicheren Kennzeichnung wird ein Wasserzeichen vorgeschrieben, welches auf jedem DIN A4-Blatt mindestens einmal komplett vorkommen muss. Recyclingfasern dürfen nicht enthalten sein, wobei sich die Definition auf Pre- und Post-consumerware bezieht, aber auch auf fabrikeigenen Ausschuss (*Anmerkung: Das erscheint nicht realistisch!*) Es darf kein Lignin enthalten sein, kein Wachs, kein Metall, kein Kunststoff, keine Nassfestmittel und keine Weichmacher. Harzleimung mit Aluminiumsalzen ist nicht erlaubt, stattdessen wird Neutral- oder alkalische Leimung vorgeschrieben. Nuancierung oder gar Färbung des Papiers ist nicht erlaubt (*Anmerkung: Das schließt auch optischen Aufheller aus*). Die verlangte Alkalireserve entspricht den Vorgaben aus der ISO 9706, der pH-Bereich, in dem der Kaltwasserextrakt liegen soll, wird mit $8 \leq \text{pH} \leq 10$ spezifiziert, etwas höher als

DIN 6738 und NEN 2728 und an der unteren Grenze etwas höher als ISO 9706. Mit der Einhaltung der Kriterien der ISO 14523 „Photographic activity test for enclosure materials“ (*Anmerkung: Diese Norm ist mittlerweile zurückgezogen und durch ISO 18916 (ISO 18916) mit gleichem Namen ersetzt*) soll sichergestellt werden, dass auch fotografische Materialien gelagert werden können. Als nötige Festigkeitsgröße wird der Durchreißwiderstand mit $\geq 6 \text{ mN m}^2/\text{g}$ spezifiziert, was für 70 g/m^2 einen Wert von 420 mN bedeuten würde und somit höher liegt als ISO 9706 (350 mN) oder gar DIN 6837 (50 mN). Nach einer künstlichen Alterung über 15 Tage bei 105°C gemäß TAPPI T453 (entspricht aber keiner der dort genannten Alterungszeiten) darf der Festigkeitsverlust maximal 12,5 % betragen.

Als zweites wird Karton für Ordner aufgeführt. Die Kriterien entsprechen denen eines Kopierpapiers, allerdings darf der Karton gefärbt sein, sofern die Farbe nicht ausblutet oder die chemische Stabilität des Kartons gefährdet.

Die dritte genannte Produktkategorie aus der Gruppe „papierbasierte Produkte“ ist die Wellpappe. Die Kriterien entsprechen denen des Kartons, jedoch wird optischer Aufheller ausdrücklich als „nicht verboten, jedoch unerwünscht“ genannt. Zusätzlich wird verlangt, dass der Kleber, der zum Befestigen des Liners auf dem Wellpapier gebraucht wird, die schon genannten Eigenschaften der Papiere nicht beeinträchtigen darf. Der Liner muss außerdem nach dieser Vorschrift beidseitig kalandriert sein.

Den Materialien zur Aufbewahrung von Dokumenten wird auch auf ISO-Ebene in der (DIN ISO 16245) Rechnung getragen. Unterschieden wird in Pappe von Typ A oder B. Beide Typen müssen die Anforderungen der ISO 9706 erfüllen (Ausnahme: Durchreißfestigkeit, hier werden für die Pappen andere Verfahren festgelegt), Typ B darf aber ligninhaltig sein, weswegen auf die Messung der Kappa-Zahl hier verzichtet wird. Bei Wellpappe sind die Papierlagen einzeln zu testen, bei Vollpappe muss eine Garantieerklärung des Herstellers über eine alkalische Fahrweise bei der Papierherstellung und über die verwendeten Rohstoffe eingeholt werden. Farben und optische Aufheller sind zu vermeiden, wenn sie dennoch vorhanden sind, dürfen sie nicht ausbluten. Die optische Dichte darf 0,2 nicht übersteigen, um leichtes Lesen, Scannen oder Verfilmen zu ermöglichen. Der Cobb₆₀-Wert (ein Maß für die Fähigkeit des Papiers, Wasser aufzunehmen) darf 25 nicht übersteigen. Eine Schachtel muss mindestens einem Druck von 20 kPa standhalten, das verwendete Papier muss eine Grammatik von 100 g/m^2 oder höher haben und der Doppelfalz-widerstand darf nicht unter 1,9 (beim Schopper-Falzgerät) bzw. 1,7 (bei anderen Falzgeräten) liegen.

2.2.4 ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009)

Die Norm "Permanence of paper or publications and documents in libraries and archives (ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009))" erhebt den Anspruch, Kriterien für gestrichene und ungestrichene Papiere festzulegen, dass diese mehrere hundert Jahre ohne signifikante Verschlechterung halten. Forschungsbedarf wird gesehen, was den Einfluss des Ligningehalts auf die Langzeitbeständigkeit von Papier angeht. Beschleunigte Alterung ist nicht Gegenstand der Norm, da man davon ausgeht, dass bei ausreichend guten Werten im ungealterten Papier immer genügend Restqualität nach einer Alterung vorhanden sein wird (ähnlich dem Ansatz der ISO 9706). Es wird darauf hingewiesen, dass neben dem Papier auch die Lagerungsbedingungen, die Bindetechnik für das Druckprodukt und die Druckfarbe eine wichtige Rolle in der Lebensdauer von Dokumenten spielen. Explizit wird im Scope (d. h. im angegebenen Anwendungsbereich der Norm) erwähnt, dass sich die Norm auf hoheitliche Dokumente (government documents) erstreckt.

Die Norm bezieht sich auf Kriterien, die im Wesentlichen nach TAPPI-Standards gemessen werden. Üblicherweise ist zwischen den TAPPI- und den korrespondierenden ISO-Normen kein oder nur ein geringer Unterschied. Daher sind keine gravierenden Unterschiede zu Aussagen zu erwarten, die sich auf ISO-Normen beziehen.

Die Kriterien beim pH-Wert im Kaltwasserextrakt für ungestrichenes Papier definieren den Bereich mit $7,5 \leq \text{pH} \leq 10$, was mit ISO 9706 übereinstimmt. Der Wert muss nicht gemessen werden, wenn der Hersteller einen alkalischen Papierherstellungsprozess zusichert, was sich an die Auffassung der ISO 9706 anlehnt. Der Durchreißwiderstand soll mindestens $5,25 \text{ mN m}^2/\text{g}$ betragen. Zur Alkalireserve soll mindestens 2 % CaCO_3 im Papier enthalten sein, ein Wert, der auch z. B. in DIN 6738 Anmerkung 1 genannt wird. Das Papier darf maximal 1 % Lignin enthalten, was durch eine Kappazahl kleiner 7 (ISO 9706 erlaubt nur 5) angezeigt werde.

Gestrichenes Papier unterscheidet sich in den Kriterien vom ungestrichenen Papier durch den größeren pH-Bereich von $7 \leq \text{pH} \leq 10$ und einen Mindestdurchreißwiderstand von nur $3,5 \text{ mN m}^2/\text{g}$. Andere Normen geben in den Anmerkungen Hinweise auf gestrichene Papiere und dass diese anders zu bewerten wären, ohne weitere Kriterien festzulegen.

Die Einhaltung der Kriterien der ANSI/NISO erlaubt das Führen des Unendlichkeitszeichens in einem Kreis als Label. Dieses entspricht dem ISO-Label, jedoch ohne den Zusatz der ISO-Nummer.

2.2.5 Bewertung und Empfehlung

Die Regularien der australischen Behörde (Rule for use of „Archival Quality“ trademark) sehen nicht praktikable Bedingungen vor, z. B. Verbot der Verwendung von fabrikeigenen Ausschuss. Des Weiteren wird die Anbringung eines Wasserzeichens verlangt, welches zumindest in Teilen auf jedem DIN A4 Bogen zu sehen sein soll. Dies erfordert bereits eine Sonderanfertigung auf einer Papiermaschine, so dass ein derartiges Papier nicht in großen Mengen produziert werden kann. Messungen nach dieser Norm sind im Rahmen von Labest Papier daher nicht zu empfehlen.

Ähnliches gilt für Papiere, die den Normen ISO 11108 oder UNI 10332 entsprechen sollen. Die dafür erforderlichen Rohstoffe (Hadern) sind nur sehr begrenzt verfügbar (siehe dazu Kapitel „Erläuterungen einiger Fachbegriffe - Hadern“). Des Weiteren werden solche Papiere anscheinend so selten nachgefragt, dass sie nur auf Sonderanforderung produziert werden. Diese Erfahrung musste gemacht werden, als nach derartigen Papieren auf dem Markt gesucht wurde, um Probenmaterial für Alterungsversuche zu bekommen. Die angegebenen Hersteller dieser Papiere (zu finden z. B. im Anhang von (Bund-Länder-Arbeitsgruppe Papierzerfall 1992)) bieten Hadernpapiere eher für Filter oder Künstlerbedarf an, nicht als Dokumentenpapiere. Auf Anfrage können sie jedoch Papiere produzieren, die den beiden Normen entsprechen. Wegen der hohen Bedeutung, die hadernbasierten Papieren in der Literatur hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit zugeschrieben werden, ist die Empfehlung, dass im Rahmen von Labest Papier ein solches Papier, welches zumindest der ISO 11108 entspricht, mitbetrachtet wird und die Normen entsprechend Anwendung finden.

Die ISO 9706 und die ANSI/NISO Z39.48 sind als gleichwertig einzustufen, jedoch schließt die ANSI gestrichene Papiere mit ein, während die ISO sie ausschließt. Beide Normen verlangen ausgewählte Rohstoffe und Mindestfestigkeiten, schreiben jedoch keine Alterungstests vor. Dies ist als Nachteil anzusehen. Jedoch sind im Rahmen des vorliegenden Projektes Papiere unbedingt auf ihre Tauglichkeit nach ISO 9706 zu prüfen, da dies die in Fachkreisen am häufigsten zitierte Norm bezüglich alterungsbeständiger Papiere ist. Gestrichene Papiere werden in Anlehnung an diese Norm mitgetestet und nach ANSI bewertet.

2.2.6 Weitere Standards

Alle Normen und Vorschriften zur Degradationsbeständigkeit und Stabilität von Papier beziehen sich notwendigerweise auf den Alterungsaspekt. Nichtsdestotrotz darf nicht vergessen werden, dass manche Schäden an Dokumenten, die möglicherweise erst nach Jahren der Lagerung bemerkt werden, nichts mit der Alterung, sondern mit mangelnder Qualität des Papiers oder der Druckfarbe bei der Auslieferung zu tun haben können.

Ein verlaufenes Schriftbild kann durch die Papier-, die Drucker- oder die Tinteneigenschaften bedingt sein. Das Papier kann Probleme beim Durchlauf durch einen Kopierer bereiten, Toner kann so schlecht haften, dass Kopien unleserlich werden.

Daher seien hier Normen aufgelistet, die die Tauglichkeit eines Papiers als Büro- und Kopierpapier sicherstellen sollen.

Es beginnt mit der Norm zu den Maßen des Papiers, die in der DIN 476-2 bzw. DIN EN ISO 216 festgelegt sind. Die DIN 19307 beschreibt die Anforderungen an Büropapier, was sich jedoch nur auf Mindestfestigkeitswerte des Papiers in Abhängigkeit von seiner Grammaturl bezieht. Verlangt wird darin auch die Erfüllung der Norm DIN 53126, wodurch die Beschreibbarkeit mit Tinte nachgewiesen wird. Letztgenannte Norm erlebt eine gewisse Renaissance, da zwar das Schreiben mit Füllfederhalter aus der Mode gekommen ist, mit dem Prüfverfahren aber manche Papierfabriken die Inkjeteignung ihrer Papiere testen.

Ein größeres Regelwerk ist die DIN EN 12281 „Anforderungen an Kopierpapier für Vervielfältigung mit Trockentoner“. Dieses definiert physikalische Eigenschaften unter Nennung der jeweiligen Prüfnorm, nach der zu testen ist. Dies wären Wölbung vor der Kopie, Abriebwiderstand, elektrischer Oberflächenwiderstand, Feuchtegehalt, statischer Reibungskoeffizient, Tonerhaftung, Opazität und flächenbezogene Masse. Eigene Prüfvorschriften enthält die Norm für die Bestimmung der Laufeigenschaften im Kopierer und zur Bestimmung der Schnittkantenqualität. Für letzteres existiert auch die ISO 22414, die Messverfahren sind aber identisch. Explizit sei noch die Norm zur Messung der Tonerhaftung, die DIN EN 12283 genannt.

Allgemein kann noch die Normenreihe DIN 19306-1 bis -3 aufgeführt werden. Hier werden, ähnlich der DIN 19306 ohne Spiegelstrichnummer, Anforderungen an Druckpapiere (Offset und Tiefdruck) gestellt. Naturgemäß wird hier auf noch mehr Normen Bezug genommen, wie Farbmessung, Weißgradmessung, Opazität, Oberflächenbeschaffenheit, Luftdurchlässigkeit, Feuchtdehnung und die Leimungsgradmessung nach Cobb. Manche dieser Werte finden sich in Untersuchungen zur Papieralterung wieder, auf andere wird bei der Spezifikation von Materialien zur Aufbewahrung von Schriftgut verwiesen.

Auch die Gestaltung des Dokumentes selbst spielt eine Rolle, wenn an die Lesbarkeit in der Zukunft gedacht werden muss. Frisch überarbeitet ist kürzlich (DIN 5008) „Schreib- und Gestaltungsregeln für die Text- und Informationsverarbeitung“ erschienen, die gleich darauf eine Berichtigung erhalten hat. Ziel der Norm ist es, eine leichte und eindeutige Lesbarkeit zu gewährleisten (man denke an O und 0) und damit die Vorgaben der Norm DIN 1450 zur Lesbarkeit zu unterstützen. Weitere einschlägige Normen finden sich im 3. Kapitel von (DIN-Taschenbuch 343 2018), in dem es um die textliche Gestaltung diverser Dokumente geht.

Im gleichen DIN-Taschenbuch gelistet sind auch Normen zur Bauplanung von Archiven. Diesen können Hinweise auf die einzuhaltenden Lagerbedingungen entnommen werden, so der DIN 67700 zum Bau von Archiven, den Vorgängerversionen zur DIN ISO 11799:2017 „Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv- und Bibliotheksgut“ sowie dem neuen ISO/TR 19815 „Management of the environmental conditions for archive and library collections“. Empfohlen werden Lagerbedingungen von unter 60 % rel. Luftfeuchte, um Schimmelbildung zu vermeiden, und Temperaturgrenzen in verschiedenen Intervallen, je nachdem, ob ein Dokument eher ruht oder häufig gebraucht wird. Es finden sich Grenztoleranzen für Luftschadstoffe (SO₂, NO_x, Ozon und andere) und weiteres, bis hin zum Risikomanagement für das Gebäude.

Dokumentenmanagement ist ein weiteres wichtiges Stichwort bei der Langzeiterhaltung von Information. Hier finden sich ebenfalls Leitlinien im DIN-Taschenbuch (etwa zur Indexierung und zur Inhaltsangabe von Dokumenten) oder in (Allscher und Haberditzl 2019). Selbst Bereiche wie Katastrophenmanagement finden sich in diesen Dokumenten. Unbedingt Beachtung finden sollten auch das Dokument IMP06 (NDA 2019) der NDA (Nuclear Decommissioning Authority) zur Installation eines Dokumentenmanagementsystems sowie das daraus zitierte Dokument „Duty Holder Management of Records“ (Office for Nuclear Regulation 2019), welches sich auch auf dem Umgang mit anderen Medien zur Informationsspeicherung bezieht.

Einen größeren Anforderungskatalog an Schriften im Büroalltag stellt (DIN ISO 11798). Ziel der Norm ist es, Schriften zu definieren, die sich über die Zeit wenig bis gar nicht ändern und ihre Fähigkeit behalten, kopiert oder verfilmt zu werden. Weiteres wurde bereits im Kapitel 2.2 ausgeführt.

Hilfreich im Projekt Labest Papier können auch die Anforderungen aus den Normen ISO 12757-2 bzw. ISO 27668-2 und ISO 14145-2 werden. Erstgenannte Norm bezieht sich auf Kugelschreiber, die zweite auf Gel-Roller, die dritte auf Rollerballstifte, alle jeweils in der Anwendung für Dokumente. Die dort geschilderten Anforderungen können jeweils analog der (DIN ISO 12757-2) entnommen werden. Diese ist zwar zurückgezogen, aber inhaltsgleich mit der ISO 12757-2. Auf diese Vorschrift wurde ebenfalls schon im Kapitel 2.2 eingegangen.

Zuletzt sei an dieser Stelle die ISO/TS 21139-1 aufgeführt. Diese bezieht sich auf Tests zur Druckbeurteilung und führt diese unter für das Druckbild belastenden chemischen, mechanischen und optischen Randbedingungen durch. Die Anwendung ist auf kommerzielle Drucke bezogen. Als ISO/TS (technical specification) besitzt das Dokument den Status einer Vornorm. Bei Bewährung soll sie innerhalb von 3 Jahren in eine reguläre Norm überführt, ansonsten zurückgezogen werden. Bei der Beurteilung von anderen Druckprodukten als Büropapier ist im Projekt Labest Papier diese Norm zu beachten.

2.2.7 Weitere Aspekte und Prüfmethoden

Neben den Standards soll auch auf generelle Methoden zur Untersuchung von Alterung eingegangen werden.

So soll auf die Arbeit von (Zou et al. 2006) verwiesen werden, die einen „Schnelltest“ für die Papieralterung vorschlagen. Durch Erhitzen der Probe auf 170 °C in einem Druckgefäß bleibt die Feuchte erhalten. Die Alterung dauert nur einige Stunden, erste Vergleiche erschienen vielversprechend. Die Methode wurde nicht weiterentwickelt und fand in der Literatur keine Beachtung.

(Porck 2000) listet in seiner Veröffentlichung 45 (!) verschiedene Methoden der künstlichen Alterung auf. Dies sind, neben den hier beschriebenen Normen, vor allem Methoden, die verschiedene Autoren in ihren Veröffentlichungen zur Beschreibung der Alterung von Papier angewandt haben. Ähnlich wie Bansa kommt er zu dem Schluss, dass natürliche Alterung nicht vorhergesagt werden kann, Alterungstests aber Hinweise zur Papierqualität und deren Resistenz gegen Alterung geben können.

(Zervos und Moropoulou 2005) greifen die Arbeiten von Shahani im Rahmen des ASTM/ISR-Projekts auf und studieren die Kinetik der Degradation von reiner Cellulose (an Filterpapier) in einem abgedichteten Gefäß. Dabei werden pH-Wert und die Entstehung flüchtiger Säuren aufgezeichnet, mechanische Eigenschaften alle 30 Tage gemessen. Der Versuch geht über 150 Tage bei 80 °C. Zunächst ändern sich die mechanischen Eigenschaften nur wenig, aber nach 90 bis 120 Tagen kommt es zu deutlichen Abfällen. Die gemessenen Werte stimmen mit prognostizierten Werten überein, die mit einer Arrhenius-Analyse über den inversen Polymerisationsgrad und seine relative Veränderung über die Zeit berechnet wurden. Zervos schließt daraus, dass die Bestände in den Archiven möglicherweise gefährdeter sind als bisher angenommen, zieht aber auch in Betracht, dass die provozierte Autooxidation im abgedichteten Reaktionsgefäß nicht die Realität in vernünftig belüfteten Archiven abbildet.

Bei Ausschreibungen kommen manchmal schärfere Limits und weitere geforderte Nachweise als in den Normen vorgeschrieben zum Tragen. So findet sich in einem Kommentar der Firma Schempp Bestandserhaltung (Hebig 2019) der Hinweis, dass Kappa-Werte von unter 2 verlangt werden, die Einhaltung des Photographic Activity Tests (dieser wird in der ISO 18916 beschrieben und auch von der (National Archives of Australia 2019) genannt), der Lichtechtheit nach der Wollskala, die Abriebfestigkeit nach Taber (DIN 53109) und die Einhaltung der (DIN 15549) für Aufbewahrungsmittel von Fotografien. Die DIN 15549 schreibt allerdings für gewisse Fotos vor, dass die Papiere keine Pufferung (Alkalireserve) haben dürfen, so dass sich in den Anforderungen ein Widerspruch ergibt. Des Weiteren wird der Oddy-Test verlangt, mit dem ein Ausgasen des getesteten Materials festgestellt werden soll (Banik 2013).

Zuletzt sei noch die Vorschrift der deutschen Wertpapierbörsen für die Ausgabe von Wertpapieren genannt (Ausschuss für Fragen des Wertpapierdrucks 2000). Hier wird für Wertpapiere eine Faserstoffzusammensetzung von 100 % Hadern empfohlen, der Anteil darf bis auf 80 % gesenkt werden. Das Papier darf nur von zertifizierten Papierfabriken bezogen werden.

2.3 Bewertung von DIN EN ISO 9706, DIN 6738, ISO 20494 und DIN ISO 5630

Neben dem Ansatz einer Papierzusammensetzung, die lange Haltbarkeit erwarten lässt (siehe vorheriges Kapitel), verfolgt ein anderer Ansatz den Gedanken, Papier künstlich zu altern und so auf seinen Zustand in der Zukunft zu schließen

2.3.1 DIN EN ISO 9706

Die DIN EN ISO 9706 (in der Leistungsbeschreibung verkürzt DIN 9706 genannt) wurde im Kapitel 2.2.2 bereits vorgestellt und findet sich zudem in der Übersicht in Tabelle 1 im späteren Verlauf dieser Ausarbeitung. Da im Zweifelsfall immer die englische Version einer ISO-Norm bindend ist, wird, wie an anderer Stelle auch, über die ISO 9706 berichtet. Die DIN-Ausgabe dazu ist die deutsche Übersetzung der ISO-Norm. Sofern die DIN-Version ein späteres Ausgabedatum hat als die ISO-Version, deutet dies auf eine Zeitverzögerung infolge der nötigen Übersetzung inklusive der Zeit für den vorgegebenen Freigabemodus hin, nicht auf eine aktuellere Version als die der ISO.

Die ISO 9706 ist die prominenteste Vertreterin, die die Alterungsbeständigkeit von Papier über seine Zusammensetzung und seine Anfangseigenschaften definiert. Sie ist die von vielen Archivaren hauptsächlich akzeptierte Norm hinsichtlich der „Permanence“, d. h. der Alterungsbeständigkeit von Papier. Die folgenden Normen, die den Ansatz der Beurteilung über eine künstliche Alterung anwenden, beschreiben nach Meinung der Normungsfachwelt eine „Haltbarkeit“ (durability) des Papiers.

2.3.2 DIN 6738

Der prominenteste und älteste Vertreter des Ansatzes einer Untersuchung des Papiers mithilfe künstlicher Alterung ist die (DIN 6738) ist. Sie legt Mindestwerte für die Festigkeit eines Papiers fest, die dessen Nutzbarkeit gewährleisten sollen. Über künstliche Alterung bei erhöhter Feuchte (65 % relative Luftfeuchte) und erhöhter Temperatur (80 °C) wird sodann das Papier angegriffen und darf über die Dauer der Einwirkung nur einen bestimmten Prozentsatz seiner ursprünglichen Festigkeit verlieren. Die Parameter der Alterung entsprechen der ISO 5630-3 (siehe später in diesem Kapitel). Die Zeitdauer der Alterung beträgt 6, 12 und 24 Tage. Nach diesen Zeiten werden die gealterten Papiere einem Durchreißtest unterzogen. Der Wert muss mindestens 40 %, 70 %, 80 % oder 85 % des Wertes vor der Alterung betragen. Aus der Alterungsdauer und dem prozentualen Restfestigkeitswert ergibt sich eine Lebensdauerklasse

(LDK), in die das Papier eingeteilt werden kann. Hat das Papier nach 6 Tagen Alterungsdauer z. B. noch 55 % seiner Ursprungsfestigkeit, dann liegt es über 40 %, aber unter 70 % und erhält die LDK 6-40.

Insgesamt sieht die DIN 6738 vier Lebensdauerklassen vor:

1. LDK 6-40: Diese Papiere halten bei schonender Behandlung voraussichtlich 50 Jahre
2. LDK 6-70: Diese Papiere halten bei schonender Behandlung voraussichtlich 100 Jahre
3. LDK 12-80: Diese Papiere halten bei schonender Behandlung voraussichtlich mehrere 100 Jahre
4. LDK 24-85: Diese Papiere haben bei schonender Behandlung und Lagerung voraussichtlich eine Lebensdauer, an die „höchste“ (Zitat aus der Norm) Anforderungen gestellt werden können.

Die DIN 6738 schreibt zudem Mindestfestigkeitswerte für die Zug- und die Durchreißfestigkeit vor. Damit soll die Gebrauchseignung des Papiers sichergestellt sein. Außerdem muss auch die Dehnung des Papiers beim Reißen im Zugversuch einen Mindestwert erreichen. Damit soll eine ausreichende Elastizität des Papiers sichergestellt sein. Niedrige Dehnung beim Bruch im Zugversuch deutet auf ein sprödes Papier hin, welches bei der Handhabung schnell kaputtgehen kann.

2.3.3 ISO 20494

Beide Ansätze aus ISO 9706 und DIN 6738 kombiniert finden sich in der (ISO 20494). Hier werden die Anforderungen der ISO 9706 übernommen, mit Ausnahme der Kappazahl, und mit den Anforderungen der DIN 6738 an ein Papier der LDK 12-80, allerdings nur auf die Durchreißfestigkeit bezogen, verknüpft. Die ISO 20494 ist die jüngste Norm in der hier behandelten Reihe. Sie wurde 2017 veröffentlicht, hat jedoch einen Vorläufer in der kanadischen Norm (CAN/CGSB-9.70-2016 2016). Die Initiative zur Erstellung dieser Norm ging auch von Kanada aus. Hintergrund war, dass die kanadische Papierindustrie moderne Holzstoffe, sogenannten CTMP (Chemothermomechanical Pulp), in ihren Papieren einsetzt. CTMP liegt bezüglich des Ligningehalts zwischen Holzstoff und Zellstoff. Es wird nur ein Teil des Lignins durch eine chemische Imprägnierung gelöst (daher „Chemo“) und im Folgeprozess unter Hitze (daher „Thermo“) und mechanischer Krafteinwirkung (daher „Mechanical“) entfernt. Ein derartiger Rohstoff ist fast so weiß wie Zellstoff, hat gute Festigkeitswerte und eine bessere Ausbeute als Zellstoff, jedoch ist noch Lignin in den Fasern enthalten, wodurch der Grenzwert der Kappazahl der ISO 9706 nicht eingehalten wird. Die ISO 20494 grenzt sich in ihrem Anhang C gegenüber der ISO 9706 und der ISO 11108 explizit ab und erhebt nur den Anspruch, für generelle Druck- und Büroanwendungen geeignet zu sein, nicht jedoch zur Beschreibung von Papieren für die Langzeitarchivierung.

2.3.4 DIN ISO 5630

Die DIN ISO 5630 heißt voll ausgeschrieben DIN ISO 5630-1 bis -7 und bezeichnet eine Reihe von Normen zur künstlichen Alterung von Papier. Teil 1 bis 5 beschreiben die thermischen Alterung, die von (Zervos 2010) in „trockene“ und „feuchte“ Verfahren eingeteilt wurden.

ISO 5630-1 beschreibt die Alterung im Trockenschrank bei 105 °C und ist identisch mit TAPPI 453 ((DIN ISO 5630-1) bzw. (TAPPI T453 sp-97)). Gemäß der Funktion eines Trockenschrankes werden ausdünstende Gase abgeführt. Autooxidation wird bei diesem Verfahren quasi unterbunden. Es handelt sich um ein trockenes Verfahren.

ISO 5630-2 wurde 1992 zurückgezogen. In ihr wurde die Behandlung bei 90 °C und 25 % rel. Luftfeuchte beschrieben, was eine trockene Lagerung in Archiven simulieren und durch die erhöhte Temperatur zu beschleunigter Alterung führen sollte. TAPPI 544 war mit der zurückgezogenen Norm identisch ist, ist jedoch in der der Revision von 2003 modifiziert worden. Statt mit 25 % wird jetzt mit 50 % rel. Luftfeuchte gearbeitet (TAPPI T 544 sp-03). Als Gründe werden genannt, dass Papier bei der doppelten Luftfeuchte auch doppelt so schnell degradieren würde. Zudem hätte sich in der Praxis herausgestellt, dass 25 % Luftfeuchte bei 90 °C von den Öfen nicht gehalten werden konnten. Es handelt sich um ein feuchtes Verfahren, da die rel. Luftfeuchte kontrolliert gehalten wird.

ISO 5630-3 beschreibt die Behandlung bei 80 °C und 65 % rel. Luftfeuchte (DIN ISO 5630-3). Sie ist das am häufigsten angewandte Verfahren zur beschleunigten Alterung und findet auch in der DIN 6837 Anwendung. Temperatur und Feuchte sind erhöht, beides bedeutet einen aggressiven Angriff auf die Cellulosekette. Auch wenn eine Vorhersage der zukünftigen Alterung entsprechend dem in der Literatur gefundenen Wissensstand sorgfältig getroffen werden muss, ist ein Ranking der Degradationsanfälligkeit verschiedener Papiere hiermit im Allgemeinen möglich. Zu den in der Literatur angesprochenen Gegenreaktionen zur Alterung sei angemerkt, dass einige Papieradditive durch Vernetzungsreaktionen (Polyaddition) wirken, z. B. Nassfestmittel oder die AKD-Leimung. Am Fachgebiet PMV trat schon die Kuriosität auf, dass ein Papier, welches nach ISO 20494 getestet werden sollte, die dort geforderten 350 mN bei der Durchreißfestigkeit erst nach der Alterung erreichte, im ungealterten Zustand nicht. Auch schreibt die Prüfmethode (INGEDE Method 11) für Deinkbarkeitstests eine künstliche Alterung von 3 Tagen im Trockenofen bei 60 °C vor, was eigentlich keine Alterung, sondern eine Reifung im Sinne der Aushärtung eventuell vorhandener vernetzender Druckfarben ist. Neben den Gegenreaktionen verweist die Literatur auch auf Aktivierung von Reaktionen bei erhöhter Temperatur, die im natürlichen Alterungsprozess nicht stattfinden würden. Informativ sei auf eine Beobachtung hingewiesen, die auf der Konferenz „Progress in Paper Physics Seminar“ (online-Seminar, Jyväskylä, PPS 2020 vom 1. – 3. September 2020; Proceedings noch nicht

veröffentlicht zur Zeit der Verfassung dieses Berichts) von Vesa Kunnari in der Diskussion nach seinem Beitrag zur Entwässerung und Trocknung mit Nanocellulose gemacht wurde: schon ab 80 °C wurden Braunfärbungen und Zersetzungserscheinungen an Nanocelluloseflocken (sehr dünnen Cellulosefolien) beobachtet. Die ISO 5630-3 ist somit als brauchbare Norm zur Erzeugung einer beschleunigten Alterung zu betrachten, die erhaltenen Ergebnisse bedürfen jedoch der wissenschaftlichen Interpretation. Sie ist ein feuchtes Verfahren nach Zervos.

Die ISO 5630-4 beschreibt Alterungstemperaturen von 120 °C und 150 °C. Sie ist ein trockenes Verfahren ohne Regelung der rel. Luftfeuchte (DIN ISO 5630-4). Ihre Anwendung ist für Isolatorpapiere gedacht, die etwa in elektrischen Transformatoren zur Anwendung kommen und dort erhöhten thermischen Belastungen ausgesetzt sind. Das Verfahren hat im Projekt Labest Papier keine Bedeutung.

ISO 5630-5 ist eine aufgrund eines Forschungsprojekts für ASTM aus den Arbeiten von (Shahani 2001) entstandene Norm (DIN ISO 5630-5). Schon in früheren Arbeiten (Shahani 1995) verwies der Autor darauf, dass die gängigen Alterungsmethoden es den bei der Degradation entstehenden Abbauprodukten ermöglichen zu entweichen. Dadurch wird der Prozess der Autooxidation unterbrochen, die Alterung entspricht nicht der natürlichen Alterung. Diese Arbeit wurde auf dem Research Workshop der American Society for Testing Materials/Institute for Standards Research (ASTM/ISR) vorgetragen und brachte eine Gruppe von Forschern zusammen, die sich mit der Prognosegüte von beschleunigten Alterungstests und der Validität solcher Tests beschäftigen sollten. Als Resultat fand sich, wie u.a. von (Bégin und Kaminska 2002) gezeigt, dass die absolute Feuchte im Papier betrachtet werden muss. Aus den Sorptionskurven von Cellulose ist bekannt, dass sich beim Wechsel des Klimas andere absolute Feuchten im Papier einstellen, je nach Temperatur und relativer Luftfeuchte. Wasser als Träger von Reaktionsprodukten spielt eine wichtige Rolle, was auch der Grund ist, warum trockene Verfahren größere Alterungsbeständigkeiten ergeben als feuchte. Zur Voraussage einer natürlichen Alterung sollte bei der künstlichen Alterung darum die Feuchte im Papier erhalten bleiben, die bei der natürlichen Alterung herrschen würde. Entsprechend müsste bei Vorgabe einer Temperatur die rel. Feuchte angepasst werden bzw. umgekehrt. Da die Sorptionskurven jedoch von der Papierzusammensetzung abhängen, ist dies nicht konsequent durchführbar, weil sonst erst das Sorptionsverhalten untersucht werden müsste. Unterschiedliche Alterungsergebnisse zwischen Einzelblatt- und Stapelalterung führten zu dem Vorschlag, die Alterung in abgedichteten Glasröhrchen vorzunehmen, damit keine Degradationsprodukte entweichen können (ähnlich wie bei der Stapelalterung). Des Weiteren führten Vergleichsversuche bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten zu dem Vorschlag, 100 °C als Alterungstemperatur zu wählen und die Proben zunächst bei 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte (dem üblichen Normklima bei der Papierprüfung) vorzubehandeln. Sodann werden die Proben in ein

abgedichtetes Glasröhrchen gepackt. Durch das Erhitzen auf 100 °C stellte sich im Röhrchen ein konstanter Klimazustand ein, da kein Wasser entweichen kann. Dann liefert eine Alterung über 5 Tage in etwa die gleichen Ergebnisse wie eine Alterung über 14 Tage bei 90 °C. Diese Parameter fanden über die ASTM D 6810-02 Eingang in die ISO. Gleichzeitig legt die ISO 5630-5 auch die Messung von mechanischen Eigenschaften fest, z. B. Doppelfalzzahl, das Arbeitsaufnahmevermögen beim Zugversuch, die Nullreißlänge und/oder den Durchreißwiderstand. Doppelfalzzahl und Durchreißwiderstand sind vorgegeben, andere Festigkeitsparameter können mitgemessen werden. Der Erhalt der Festigkeit über die Alterung in % wird als Retentionszahl definiert. Die Alterungsresistenz definiert sich über die niedrigste Retentionszahl, die bei den gemessenen mechanischen Eigenschaften erreicht wurde. Eine Vorgabe für eine Einteilung stabil/instabil gib es in der Norm nicht. Die Norm deckt viele Aspekte der neueren Erkenntnisse zur Papieralterung ab und sollte im Projekt Labest Papier mitbedacht werden. Es handelt sich auch um eine feuchte Alterung, obwohl im Trockenschrank keine Feuchte reguliert werden muss.

ISO 5360-6 beschäftigt sich mit der künstlichen Alterung unter Einwirkung von Stickstoffdioxid (DIN ISO 5630-6). Die Norm basiert ebenfalls auf dem schon erwähnten Forschungsprojekt der ASTM/ISR und beruht auf der Übernahme der ASTM D 6833. Die stärksten Schadstoffgase in der Büroluft sind SO₂ und NO_x. Mit SO₂ haben einige Forscher Versuche durchgeführt und Ergebnisse publiziert (siehe z. B. (Fellers 1989) oder (Zervos 2010)). Es wird konstatiert, dass NO_x zu stärkerer Vergilbung führt als SO₂. Die Auswirkungen zeigen sich kaum in einer mechanischen Degradation. Die ISO 5630-6 verlangt zwar die Messung der Doppelfalzzahl und des b*-Wertes (das ist der Gelbwert im CIE-L*a*b*-Farbraum), die Literatur sagt jedoch aus, dass sich die Veränderungen während der künstlichen Alterung im Wesentlichen in der Veränderung des Gelbwertes wiederfinden. Da NO₂, wie in der Norm als Vertreter für NO_x vorgeschrieben, ein hochgiftiges Gas ist, die Auswirkung sich vor allem aber bei optischen Eigenschaften zeigt, wird vorgeschlagen, auf die Nutzung dieser Messmethode im Rahmen von Labest Papier zu verzichten. Dies fällt umso leichter, als die Vergilbung auch über andere Alterungsmethoden geprüft werden kann. Zudem hat die Suche nach einem Labor, welches in der Lage ist, diesen Test durchzuführen, bisher weder in Europa noch den USA oder Kanada zum Erfolg geführt. Die Methode wird nicht nachgefragt, daher sind die Prüflaboratorien nicht darauf ausgerichtet. Man kann also nicht von einer gängigen Alterungsmethode sprechen.

Die ISO 5630-7 (DIN ISO 5630-7) als letzte Norm in dieser Reihe beschreibt eine künstliche Alterung bei Lichteinstrahlung. Auch diese Norm entstammt dem Forschungsprojekt der ASTM/ISR und beruht auf der Übernahme der ASTM D 6789. Cellulose absorbiert kaum sichtbares Licht, dafür aber stark im UV-Bereich unter 200 nm. Hier kann es zur Bildung von freien

Radikalen kommen, die eine Oxidation der Celluloseketten auslösen können. Allerdings äußert sich dieser Effekt nicht messbar in den mechanischen Eigenschaften, dafür stark in den optischen Eigenschaften. Die Norm schreibt die Messung des ISO-Weißgrads bei Innenraumlicht und die Messung des b^* -Wertes vor. Jedoch sind die in der Norm definierten Strahlungsbedingungen ungewöhnlich und nicht haltbar. Ungewöhnlich ist, dass ein Strahlungswert von 20 W/m^2 über einen Zeitraum von 5 Tagen vorgeschrieben wird. Andere Normen zur Bewertung des Einflusses von Licht auf einen Stoff (z. B. DIN ISO 12040 „Bestimmung der Lichtechtheit mit gefiltertem Xenon-Bogenlicht“ (DIN ISO 12040)) arbeiten mit der „Wollskala“ (einem Vergleich mit bekannten Textilfarben) oder definieren eine Energie in J/m^2 , (siehe z. B. DIN EN ISO 4892-2:2013-0g Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Xenonbogenlampen (DIN EN ISO 4892-2)) der eine zu testende Fläche ausgesetzt sein muss. Übliche Lampen zur Alterung mit Licht liegen bei mindestens 265 W/m^2 (Auskunft der Firma Suntest, einem Anbieter von Lichtalterungsgeräten). Auch bei dieser Norm erbrachte eine Umfrage unter europäischen Prüflaboratorien, dass niemand nach dieser Norm misst. Es gab jedoch den Hinweis, dass die ISO schon angesprochen worden sei, dass in der Norm falsche Parameter stünden.

2.3.5 Bewertung und Empfehlung mit Vergleichstabelle

Von den dargestellten Methoden zur beschleunigten Alterung stellen die ISO 5630-3 (Alterung bei $80 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65% Luftfeuchte) sowie die ISO 5630-5 (Alterung bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ im verschlossenen, bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und 50% Luftfeuchte vorkonditionierten dichten Gefäß) die für das Projekt Labest Papier am besten passenden Normen dar. Erstere arbeitet auf einem Temperatur- und Feuchteniveau, welches im Wesentlichen Alterungsprozesse begünstigt und nicht gegenläufige Reaktion übermäßig beschleunigt, obwohl diesen Nebenreaktionen nicht ausgeschlossen werden können. Die zweite Norm hilft, die Problematik der Autooxidation zu bewerten, allerdings wird dieser Effekt überprovoziert, da in einer realen Lagersituation Zerfallsprodukte wegdiffundieren können. Die Nutzung beider Methoden im Rahmen des Projektes verspricht Erkenntnisgewinn zum Alterungsprozess und wird daher empfohlen.

Dem Problem einer adäquaten Berücksichtigung der gegenseitigen Kontamination mit Abbauprodukten (Kreuzkontamination) bei gleichzeitig in einem Klimaschrank gealterten Proben muss im Projekt Labest Papier Rechnung getragen werden. (Shahani 1995) hatte Versuche mit Kunststofffolien durchgeführt, zwischen denen das zu alternde Papier während der Behandlung verblieb. Eine Wiederholung dieses Ansatzes mit Alufolie erscheint vielversprechend, da Alufolie aromadicht ist und selbst keine Weichmacher enthält. Darum sollen Proben in Alu-Folie verpackt gealtert werden.

ISO 5630-1 arbeitet auf zu hohem Temperaturniveau und ohne Feuchteregulierung, was quasi einem Austrocknen des Papiers gleichkommt. Dies entspricht nicht dem zu erwartenden Alterungsverlauf. ISO 5630-4 ist für Isolatorpapiere gedacht und findet hier keine Anwendung, ISO 5630-6 und 5630-7 haben überraschenderweise in der Praxis keinen Bedarf gefunden, lassen auch keinen Erkenntnisgewinn erhoffen und sollen daher nicht berücksichtigt werden.

Von den anderen Messmethoden scheint noch der Oddy-Test erwähnenswert. Die mit diesem Test beabsichtigte Intention, Ausgasungen zu beurteilen, soll im vorliegenden Projekt durch die Messung flüchtiger organischer Bestandteile Rechnung getragen werden.

Zeitlich ist die DIN 6738 die älteste Norm, sie wurde im November 1990 veröffentlicht. Es folgte die ISO 9706, die als ISO/DIS 9706 ab Oktober 1992 zur Abstimmung gestellt und im März 1994 veröffentlicht wurde. Die ISO/DIS 11108 lag ab August 1995 zur Abstimmung vor und trat im Dezember 1996 in Kraft. Die ISO 20494 ist mit Ausgabedatum Dezember 2017 die jüngste Norm in der Reihe, hat aber einen nationalen Vorläufer in Kanada (CAN/CGSB-9.70-2016 2016), der im Jahr 2000 erstmalig verabschiedet wurde.

Früh schon wurden Vergleiche zwischen den Normen angestellt. Deventer et al. vergleichen in Ihrem Artikel drei Normen zur Alterungsbeständigkeit bzw. Papierstabilität (van DEVENTER et al. 1995):

- a) NEN 2728 Permanent paper – Requirements and Test Methods
- b) ISO 9706 (Paper – requirements for permanence)
- c) DIN 6738 (Einteilung in Lebensdauerklassen - LDK)

NEN 2728 misst die Doppelfalzzahl nach Schopper und verlangt einen Wert > 50 , was eine Widerstandswert von 1,7 entspricht und damit unter den Anforderungen der ISO 11108 von 2,42 läge. Der Durchreißwiderstand wird auf die flächenbezogene Masse bezogen (Mindestwert: $5,25 \text{ mN m}^2/\text{g}$; das entspräche $367,5 \text{ mN}$ bei einem 70 g/m^2 Papier und ist damit höher als die ISO 9706), NEN 2728 misst aber keine Bruchkraft oder Bruchdehnung.

ISO 9706 legt ein Limit für die Kappazahl fest, teilt die Mindestwerte für den Durchreißwiderstand in zwei Bereiche ein, führt aber keine Alterung durch. Auch verlangt die ISO 9706 keine Bruchkraft oder –dehnung.

DIN 6738 separiert in 4 Lebensdauerklassen, auf die hin getestet werden kann. Die höchste Klasse, LDK 24-85, nennt sich „Alterungsbeständiges Papier“. DIN 6738 verlangt weder den Kappa-Wert noch die Alkalireserve, bezieht sich aber in seiner Anmerkung 1 darauf, dass ungestrichene Papiere aus gebleichtem Zellstoff mit mindestens 2 % CaCO_3 -Gehalt den Stand der Technik für Papier höchster Alterungsbeständigkeit entsprechen.

Der Artikel von Deventer erwähnt ein interessantes Projekt, bei dem der Einfluss der Luftverschmutzung mitgetestet wurde. Sodann wurden 5 unterschiedliche Papiere getestet und zwar als Referenz ohne Alterung (bei 23 °C/ 65 % rel. LF (!)), gealtert gemäß DIN 6738 (bzw. ISO 20494, nur 12 Tage) bei 80 °C und 65 % rel. LF und zum Vergleich noch 3 Tage gealtert im Trockenschrank bei 105 °C (das entspräche der Alterung nach (DIN ISO 5630-1)).

Durch die Auswahl der Papiere (Nadelholz Sulfit-Zellstoff, Linters mit 5 % Nadelholz ohne Füllstoff und ohne Leimung, Archivpapier mit 3 % CaCO₃ und nur aus Linters als Faserstoff bestehend, alkalische hergestelltes Kopierpapier und sauer hergestelltes Kopierpapier) ergibt es sich, dass einige von ihrer Zusammensetzung her der ISO 9706 nicht genügen, z. B. das reine Linters-Papier, welches, da ohne Füllstoff, die Alkalireserve nicht erfüllen kann.

Keines der Papiere erfüllt die Anforderungen aller drei Normen! Dies liegt vor allem am pH-Wert in Kaltwasserextrakt, der laut NEN 2728 und DIN 6738 zwischen 7,5 und 9,5 beim ungealterten Papier liegen soll. Nur das Archivpapier und das alkalische hergestellte Kopierpapier liegen über pH = 7,5. Ansonsten ist das Archivpapier das einzige, welches die Anforderung der NEN 2728 an die Doppelfalzzahl erfüllt.

Die Anforderungen der ISO 9706 bestehen im Test nur das Archivpapier und das alkalisch hergestellte Kopierpapier. Bewertet nach der DIN 6738 erreicht nur das Archivpapier die Klassifizierung LDK-24-85 (alterungsbeständiges Papier).

In der Literatur wird vornehmlich auf die ISO 9706 und die DIN 6738, seit ihrer Existenz auch auf die ISO 20494, Bezug genommen. Bei Ausschreibungen für alterungsbeständiges Papier spielen nach Aussage der Anbieter solcher Papiere die ISO 9706, die DIN 6738, die ISO 16245 (für Aufbewahrungsmaterial) und die ANSI/NISO Z39.48 eine Rolle. Die anderen Normen und Vorschriften haben kaum Bedeutung bzw. sind nicht anwendbar.

Die ISO 16245 bezieht sich nur auf Aufbewahrungsmaterialien (Archivmappen und Schachteln), hat also im Rahmen der zu untersuchenden Kombination Papier/Schreib-Bedruckstoff im Rahmen des Projektes Labest Papier nur eine Randbedeutung.

Ein Vergleich der wichtigsten Normen zur Alterungsbeständigkeit bzw. Papierstabilität zeigt die Tabelle 1 auf der folgenden Seite.

Festigkeitswerte werden in der Papierprüfung häufig auf die flächenbezogene Masse bezogen, um eine Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlich schweren Papieren zu erlauben. Dem ist allerdings zu entgegnen, dass die DIN 6837 argumentiert, ein Papier müsse eine Mindestfestigkeit haben, um zum einen benutzt werden zu können, zum anderen einen eventuell nötigen Konservierungsprozess zu bestehen. Trotzdem liegt die DIN 6738 mit verlangten 50 mN beim

Durchreißwiderstand deutlich unter der Mindestanforderung von 350 mN, die von der DIN EN ISO 9707 ab flächenbezogenen Massen von 70 g/m² verlangt werden.

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Normen/Anforderungen zur Beständigkeit von Papier

ISO 16245	ISO 5630-5	ISO 20494	DIN 6738	NEN 2728	UNI 10332	ISO 11108	ANSI/NISO Z39.48	Rules for 'Archival Quality' trademark™	ISO 9706	Parameter
-	-	-	-	-	Hadern, DP ³ <1000; Cu/Fe limitiert	überwiegend Hadern, erlaubt: gebil. Zellstoff	< 1 % Lignin	kein Recyclinganteil, kein Produktionsausschuss	-	Faserstoff
Schachteih (Pappe, Wellpappe)	alle Arten graphischer Papiere	alle Arten graphischer Papiere	Ungestrichen und gestrichen	keine Angabe	ungestrichen; auch Karton	unbedruckt - Verweis auf ISO 9706	Papier, gestrichen und ungestrichen (natur)	Papier (auch gestrichelt) ungefärbt, Karton, Pappe, Wellpappe	unbedruckt, ungestrichen, keine Pappe	Sorte
7,5 - 10	-	7,5 - 10	7,5 - 9,5	7,5 - 10	7,5 - 10	7,5 - 10	7,5 - 10 bzw. 7 - 10 bei gestr.	8,0 - 10	7,5 - 10	pH
> 1,7 / 1,9	messen	-	-	> 1,7	> 2,18, siehe m _A	> 2,24 / 2,18	-	-	-	DFW ¹
-	-	-	> 5 N in CD	-	-	-	-	-	-	Bruchkraft
-	-	-	> 0,5%, MD	-	-	-	-	-	-	Dehnung
< 5 (Typ A) - (Typ B)	-	-	-	-	< 3	< 5	< 7	ligninfrei (Phloroglucintest)	< 5	Kappa
0,4 mol/kg	-	>0,8 mol/kg	2 % CaCO ₃	0,4 mol/kg	0,4 mol/kg	0,4 mol/kg	2 % CaCO ₃	2 % Ca- oder MgCO ₃	> 0,4 mol/kg	Alk.-Res.
-	messen	> 350 mN // 6 m _A -70	> 50 mN in MD	>5,25 mNm ² /g	> 350 mN // 6 m _A -70	> 350 mN, MD und CD	> 5,25 mNm ² /g bzw. 3,5 mNm ² /g bei	> 6 mNm ² /g	> 350 mN // 6 m _A -70	Durchreißwiderstand
-	5 d/100 °C	12 d/80 °C/65 %	80 °C/ 65 %	12 d/80 °C/65 %	24 d/80 °C/65 %	-	-	15 d / 105 °C	-	Alterung
> 100	-	-	40 - 400 g/m ²	-	- ; aber DFW	> 70	-	-	>25	m _A , g/m ²
< 25	-	-	-	-	-	-	-	soll geleimt sein	-	Cobb ₆₀
kein Ausbl.	-	-	-	-	Weiß	-	-	PAT ² erforderlich	-	Optik
-	-	Konformität	LDK ⁴	∞ Symbol	Konformität	∞ Symbol	∞ Symbol	™ Wasserz. erforderlich.	∞ Symbol	Kennzeichn.

¹ DFW = Doppelfalz widerstand (ggfs. umgerechnet aus der Doppelfalzzahl)

² PAT = Photographic activity test nach ISO 14523

³ DP = durchschn. Polymerisationsgrad

⁴ LDK = Lebensdauerklasse

Die Idee der ISO 11108 und der NEN 2728, die Doppelfalzzahl als Festigkeitswert in die Bewertung aufzunehmen, ist bedenkenswert. Die Doppelfalzzahl dient bei hochbeanspruchten Papieren (vor allem Geldscheinen) als wichtiges Qualitätskriterium. Dies könnte dazu dienen nachzuweisen, dass kein signifikanter Festigkeitsverlust trotz regelmäßigen Gebrauchs zu erwarten ist.

Der angegebene pH-Wert-Bereich der NEN 2728 und der aus Anmerkung 1 der DIN 6738 zur LDK 24/85 (Langzeitbeständiges Papier) ist kleiner ($7,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$) als der von der ISO 9706 zugelassene ($7,5 \leq \text{pH} \leq 10$). Die NEN 2728 schreibt die Messung des pH-Wertes vor, die DIN sieht die Erfüllung als gegeben an, wenn das Papier mindestens 2 % CaCO_3 enthält und nur aus gebleichtem Zellstoff oder Hadern hergestellt wurde. Die ISO schreibt die Messung ebenfalls vor mit der Einschränkung, dass der pH-Wert eigentlich in keiner Schicht eines Papiers unter 7,5 liegen dürfe, was erreicht sei, wenn der Hersteller einen alkalischen Herstellungsprozess garantiert.

An der Norm DIN 6738 wird kritisiert, dass diese unterstelle, Papiere, die die mechanischen Eigenschaften erfüllen, hätten automatisch den nötigen pH-Wertbereich und die ausreichende Alkalireserve, was aber nicht der Fall sei. Außerdem wären die gewählten mechanischen Tests nicht selektiv genug, da selbst bekanntermaßen alterungsanfällige Papiere (im Artikel hauptsächlich das sauer hergestellte Kopierpapier) die Minimalanforderungen erfüllen würden und auch kein Bezug zur flächenbezogenen Masse des Papiers bestehe.

Die NEN 2728, die DIN 6738 und die ISO 20494 sind als gleichwertig anzusehen, wenn auch die DIN mit 24 Tagen den ausgedehntesten Alterungstest vorschreibt und die NEN mit der Messung des Doppelfalzwidestandes einen wichtigen Festigkeitswert misst, der die Benutzbarkeit des Papiers charakterisiert. Nachteil dieser drei Normen ist, dass sie die Zusammensetzung der Papiere außer Acht lassen. Die Leitungsbeschreibung sieht eine Messung nach DIN 6738 und sogar noch weiterer Alterungszeiten vor. Dem ist zuzustimmen, zumal dadurch die ISO 20424 automatisch mit abgedeckt ist. Empfohlen wird, noch den Doppelfalzwidestand mitzumessen, wodurch automatisch die NEN 2728 mitberücksichtigt wird.

Bei Berücksichtigung dieser Empfehlung können die wichtigsten Papiersorten (Hadernpapier, ligninhaltiges Papier, ligninfreies Papier, gestrichen und ungestrichen) normgerecht gemessen, beurteilt und verglichen werden. Die Normen ISO 9706, ANSI/NISO Z39.48, ISO 11108, UNI 10332, NEN 2728, DIN 6738 und ISO 20494 wären berücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wären die Rules for use of „Archival Quality“ trademark, da sie nicht einhaltbar sind. Die ISO 16245 findet bei Dokumentenpapier keine Anwendung.

Einen Sonderfall stellt die DIN ISO 5630-5 dar, die keine Norm zur Bestimmung der Alterungsbeständigkeit bzw. Dauerhaftigkeit von Papier ist, sondern eine Norm zur beschleunigten Alterung. Da in dieser Norm, ähnlich wie in den Normen, die Alterungstests beinhalten, Festigkeitswerte und deren Resilienz gemessen werden, ist sie hier mit aufgeführt. Die Besonderheit liegt in der Art der Alterung, bei der autooxidative Prozesse bewusst provoziert werden (siehe auch nächstes Kapitel). Die Norm soll wegen des zur erwartenden Erkenntnisgewinns im Projekt Labest Papier Berücksichtigung finden.

2.4 Vorteile der Langzeitspeicherung auf Papier gegenüber digitaler Speicherung

Im Zuge dieser Literaturrecherche hat sich bei Diskussionen mit Archivaren oder Behörden anderer Länder oft ein „Dreiklang“ für die Langzeitarchivierung ergeben: analog auf Papier, digital elektronisch und optisch auf Mikrofilm. Dies findet sich auch in den Normen wieder. Auch (Pescatore und Palm 2020) äußern sich zur Notwendigkeit, wichtiges Wissen redundant an die kommenden Generationen weiterzugeben. Hier sind einige Argumente bezüglich der analogen Speicherung aufgelistet.

2.4.1 Vorteile der analogen Speicherung auf Papier

Papier hat sich wegen seiner guten Verfügbarkeit, seinen guten Nutzungseigenschaften und seiner Tauglichkeit als langfristiger Informationsträger gegenüber anderen Beschreibstoffen in der Geschichte wie Pergament, Ton- oder Wachstafeln, Folien, gravierten Platten oder ähnlichem durchgesetzt. Der überwiegende Teil des menschlichen Wissens wurde bis zum Beginn des digitalen Zeitalters auf Papier niedergeschrieben. Unter Einbeziehung des Namensgebers für Papier, Papyrus, sind Beschriftungen mit Tinten auf einem aus pflanzlichen Fasern bestehenden Gewebe seit über 5.000 Jahren bekannt. Die prinzipielle Eignung des Papiers, über Jahrhunderte Information zu speichern, ist daher erwiesen.

Papier ist ein Naturstoff, der der Alterung unterliegt, wie allerdings alle anderen Materialien auch. Gerade aus der Problematik mit den sich zersetzenden Papieren in den Archiven ist gleichzeitig auch bekannt, dass diesem Problem begegnet und geschädigtes Papier restauriert und wieder nutzbar gemacht werden kann. Viel hängt dabei von den Lagerungsbedingungen ab, die durch konsequentes Monitoring im optimalen Bereich gehalten werden können. Ist dies zeitweise nicht möglich, so lassen sich die Konsequenzen daraus jedoch abschätzen und geeignete Ausgleichsmaßnahmen ergreifen.

Beschriebenes Papier braucht keine separate Energiequelle, um seine Information preiszugeben. Umgebungslicht genügt. Es entfällt auch ein Lese- oder Decodiergerät. Die Sehkraft des Menschen genügt, allerdings ist sicherzustellen, dass man in Tausenden von Jahren noch

Kenntnisse von unserer heutigen Schreibweise und Schriftzeichen hat. Jedoch muss nicht mitbedacht werden, dass in Tausenden von Jahren unsere heutigen Batterien oder heutige Form der Energieversorgung bzw. unsere heutige Technik noch verfügbar sein muss, um die Informationen auf dem Papier zugänglich zu machen.

Papier als Ordnungsmedium bietet Hilfe durch seine physische Präsenz. Seine Verfügbarkeit ist direkt sichtbar und haptisch erfahrbar. Es müsse keine Voraussetzungen wie ein funktionierendes Computersystem, eine stabile Datenverbindung und eine kompatible Netzstruktur zum Austausch der Information vorhanden sein. Man geht in die Bibliothek bzw. den Lagerort und sichtet die Dokumente.

Papier bietet durch die völlig andere Technologie der Informationsspeicherung gegenüber digitalen Medien oder Verfilmungen zusammen mit diesen eine diversitäre Redundanz. So kann das Risiko für einen Informationsverlust deutlich verringert werden.

Der Gebrauch von Papier ist einfach und intuitiv. Es braucht keine Schulung oder Anleitung, um mit Papier umgehen zu können. Selbst Klein- und Vorschulkinder wissen mit Papier und Stift etwas anzufangen. Auch dies lässt den Optimismus zu, dass auf Papier verankerte Funktionen zukünftige Generationen lange nach uns erreichen wird.

Selbst Informationsverlust kann bei Papier reversibel sein. Schon das menschliche Gehirn ergänzt gewisse fehlende Teile einer Schrift oder eines Wortes automatisch, trotz inkorrekten Schriftbildes bleibt die Information erhalten. Selbst wenn eine Druckfarbe ganz verschwunden sein sollte, kann über die Auswirkungen beim Druckvorgang (plastische Einprägung des Buchstabens in die die Papieroberfläche) die Information wieder sichtbar gemacht werden. Oder die chemische Einwirkung der Schrift auf die Papieroberfläche (lokale chemische Veränderungen an dieser Stelle) bewirkt, dass zumindest Hoffnung auf eine Rekonstruktion der ursprünglichen Form mithilfe forensischer Methoden besteht.

Zuletzt sei am Beispiel der Hieroglyphen aufgezeigt, dass selbst der Verlust des Wissens um die Deutung einer Schrift für den menschlichen Geist nicht unumkehrbar sein muss. Die Neugierde auf die verschlossene Information, die aber so offensichtlich vor einem liegt, treibt an, das Geheimnis vergangener Zeiten entschlüsseln zu wollen. Diesem Aspekt kommt bei (Pescatore und Palm 2020) eine eigene Dimension bei der Entwicklung von RK&M-Strategien (Remember, Knowledge & Memory) zu, der „CuD“ (Curiosity upon Discovery) genannt wird.

2.4.2 Nachteile der digitalen Speicherung

Über lange Zeiträume ist damit zu rechnen, dass die Lesekompetenz und das Verständnis der Dokumentation verloren gehen können (siehe das Beispiel der Hieroglyphen). Disketten, CDs, Sticks, Cloudinformationen, Mikrofilme oder ähnliches, denen man in ferner Zukunft gar nicht

ansieht, dass hier Informationsträger vorhanden sind, können somit nicht dazu anregen nachzuforschen, was hier eventuell an Informationen gespeichert ist. Digitale Speicherung heißt immer auch Codierung in einem binären System. Selbst wenn bekannt sein sollte, dass ein Medium digitalisierte Information enthält, dann muss man wissen, wie codiert wurde: 4 bit, 8 bit, 16 bit etc., jedesmal ergibt sich eine andere Zahl von Möglichkeiten, die hinter einer Binärreihe versteckt sein kann. Der Aufwand für eine eventuell nötige Dechiffrierung steigt immens.

Die Handhabung von digitalisiertem Material braucht Lese- und Schreibgeräte, über deren Erhalt sowie die Dokumentation zu deren Bedienung man sich ebenfalls Gedanken machen muss. Am Beispiel des Konrad-Zuse-Museums in Hünfeld kann man sich klarmachen, was dies bedeutet. Die von Zuse entwickelten Computer waren lange Zeit Hightech und wurden von Behörden zu komplizierten Berechnungen herangezogen. Die heutigen Mitarbeiter des Museums tun sich schwer, trotz noch vorhandener Dokumentation die Geräte am Laufen zu halten, da benötigte Ersatzteile nicht mehr verfügbar sind.

Digitale Medien brauchen Strom. Auch die Versorgung damit muss bei einer Langzeitarchivierung bedacht werden. Es ist der Nachwelt in einer fernen Zukunft zu vermitteln, dass eine Stromquelle mit einer bestimmten Spannung und Frequenz gebraucht wird, um ein Lesegerät zu betreiben.

Auch digitale Speichermedien altern. Magnetbänder, eines der ersten Speichermedien, dürften heute nur noch mit Glück digital nutzbar sein. Analog ist dies schon eher möglich, da bei analogen Verfahren interpoliert werden kann, wenn ein Teil der Information verloren gegangen ist. Alte Tonaufnahmen ließen sich dadurch z. B. restaurieren. Verlorene Bitkombinationen sind aber nicht wieder herstellbar. Die Entwicklung bei den digitalen Speichermedien verläuft sehr schnell, man muss daher sehr häufig die Daten auf neue Speichermedien übertragen. Diese Migration muss durchgeführt und anschließend auf Korrektheit geprüft werden, was hohen Aufwand bedeutet. Nicht zu vernachlässigen ist die Gefahr der einer kompletten Löschung digitaler Speicher durch den Elektromagnetischen Impuls (EMP). In leichter Form findet dieses Phänomen z. B. bei Wetterblitzen statt und kann abgewehrt werden. In stärkerer Form, etwa bei einer Nuklearexplosion oder bei Sonnenwinden durch Sonnenflecken, ist ein einfacher Schutz nicht mehr ausreichend (Chemie.de 2021).

2.4.3 Langzeitspeicherung auf DNA und Quarz

Digitale Speicherung wird meist mit Computern und elektronischen Datenträgern assoziiert. Streng genommen bedeutet „digitale Speicherung“ jedoch, dass Informationen mithilfe eines Zahlencodes abgelegt werden. Bekannt ist der in elektronischen Systemen verwendete Binär-code mit den Ziffern „0“ und „1“. Bei diesem wiederum ist es gebräuchlich, der Übersichtlichkeit

halber jeweils 4 Ziffern zusammenzufassen, wodurch ein Hexadezimalcode entsteht, der die Ziffern 0 bis 9 sowie A bis F enthält, wobei hier die 0 für die Binärziffernfolge „0000“ und das F für die Binärziffernfolge „1111“ steht. (Wikipedia (Hg) 2021) Grundsätzlich lassen sich also verschiedene Zahlensysteme für die Codierung von Information verwenden.

Die Art einer Speicherung anhand eines Binärcodes funktioniert auf unterschiedliche Weise: elektrisch über „An = 1“ und „Aus = 0“ (wie in heutigen Computern), magnetisch „Ja“ und „Nein“ (wie z. B. in magnetischen Datenträgern), optisch „Weiß“ und „Schwarz“ (z. B. bei Barcodes), Reliefs „Hoch“ und „Tief“ (z. B. Braille-Schrift) etc. Der Vorteil des Binärcodes ist, dass er in der Informatik gängig und durch Normen beschrieben ist. Dieser Code lässt sich somit leicht auf andere Medien übertragen, mit denen sich binäre Zustände darstellen lassen. Zwei für die Langzeitspeicherung interessante Möglichkeiten werden hier kurz vorgestellt.

2.4.3.1 Langzeitspeicherung über molekulare DNA

Die vier Grundbausteine der Erbsubstanz, Guanin, Thymin, Cytosin und Adenin, können den Binärziffernfolgen 10, 11, 01 und 00 zugeordnet werden. Diese Zuordnung ist per Definition festgelegt worden. Die Ziffernfolge „1111“ entspräche dem „F“ im Hexadezimalsystem und der Basenfolge „Thymin-Thymin“ in der DNA-Codierung. Es bedarf also nur eines einfachen Algorithmus, der Daten in DNA-Sequenzen umsetzt. Die Sequenzen sind mit heutigem Wissensstand und heutigen Laborausstattungen leicht herzustellen und zu duplizieren. Im LOEWE-Forschungsprojekt „MOSLA“ (= Molekulare Speicher zur Langzeitarchivierung) wird dieses Prinzip genutzt, um den Verlust von Information zu verhindern (LOEWE-Projekt MOSLA (Hg.) 2021).

Eingebettet in Glas wird die Lebensdauer der Information auf mindestens 1.000 Jahre geschätzt. Der Informationsgehalt ist so dicht, dass Prof. Dr. Dominik Heider, der Sprecher dieses Forschungsschwerpunktes, sich das gesamte derzeitige Wissen der Menschheit in ca. 1,5 kg DNA gespeichert vorstellen kann. Bedingt durch die leichte Duplikation ließen sich so sehr viele Backups von Informationen erzeugen. Der Verlust eines einzelnen Speichers ließe sich dann leicht verschmerzen. Das System ist in sich dauerhaft gültig, da es DNA geben wird, solange es Leben gibt. Die Decodierung verlangt jedoch einen Zivilisations- und Wissensstand, der dem heutigen mindestens ebenbürtig ist. (ProLOEWE (Hg.) 2019)

Im Forschungsprojekt selbst wurde der Ergebnisbericht des Hightech Forums 2021 auf DNA veröffentlicht und an interessierte Personen versandt. Das folgende Bild zeigt somit, wie ein 25seitiger Ergebnisbericht (Hightech Forum (Hg.) 2021) auch aussehen kann.



Abbildung 3 Ergebnisbericht auf DNA in braunem Glasbehälter (Quelle: Dr. Schaffrath)

2.4.3.2 Quarz – Speichern in 5D

An der University of Southampton wurde bereits 2013 eine Technologie entwickelt, bei der mithilfe von Laserimpulsen Quarzglas an definierten Stellen so modifiziert wird, dass sie als Speichermedium dienen kann (University of Southampton (Hg.) 2016). Das Licht des Lasers pulsiert im Femtosekundenbereich (das sind $1/1.000.000.000.000$ Sekunden), jeder Impuls hat eine eigene Intensität. Die festgelegte kurze Zeit der Einwirkdauer des Laserimpulses auf eine fokussierte Stelle sorgt dafür, dass das Quarzglas nur an dieser Stelle in einem sehr engen Volumenbereich modifiziert wird. Die Stärke des Impulses führt zu einer bestimmten räumlichen Ausdehnung. Dadurch wird ein Volumenelement (Voxel) im Quarzglas erzeugt, dessen Größe über die Intensität des Laserimpulses eingestellt werden kann. Zudem ist das Laserlicht polarisiert. Dadurch bekommt das Voxel eine Orientierung in der Kristallstruktur des Glases, die beim späteren Auslesen wieder detektiert werden kann. Durch Fokussierung der Laserimpulse mittels optischer Konstruktionen lässt sich im Quarzglas ein durch die x-y-z-Raumkoordinaten genau bestimmbarer Punkt ansteuern. Die „belegbaren“ Punkte müssen so weit voneinander entfernt sein, dass verschiedene Voxel sich nicht überschneiden. Dadurch ist jedes Voxel durch seine Raumkoordinaten x, y und z sowie durch seine Größe und seine Orientierung definiert. Daher nannte das Forschungsteam von Southampton diese Technik „5D“, weil quasi 5 Dimensionen genutzt werden können. Die Voxel werden in unterschiedlichen Lagen angeordnet, wobei die Lagen nicht nur parallel verlaufen können, sondern auch weitere Lagen in kreuzenden Winkeln angeordnet werden. Das erlaubt eine hohe Speicherdichte. Auf der Fläche eines 2 €-Stücks können etwa 360 Terabyte in einer Voxelschicht gespeichert wer-

den. Eine 2 mm starke Glasplatte kann etwa 100 Voxelschichten beinhalten (PC Games Hardware (Hg.) 2019). In der angegebenen Quelle ist auch ein Video hinterlegt, welches die Technologie kurz und anschaulich darstellt.

Versuche an der University of Southampton haben gezeigt, dass selbst 1.000 °C temporär dem Glas nichts anhaben konnten. Im Falle einer Dauertemperatur von 190 °C beziffert das Forschungsteam die Haltbarkeit der Daten auf 13,8 Mrd Jahre. Das sind beeindruckende Zahlen, die nicht vergessen lassen sollten, dass auch diese Technologie einen hohen Wissensstand und ausgereifte Apparate braucht, damit sie angewandt werden kann.



Abbildung 4 Speichern auf Quarz (Quelle: (University of Southampton (Hg.) 2016))

2.5 Offene Fragen und potentieller Forschungsbedarf

Während der Literaturrecherche haben sich einige Fragen ergeben, die noch nicht abschließend geklärt werden konnten. Vor allem zum Einfluss der Tinten und Druckfarben auf den Alterungsprozess wurde wenig Literatur gefunden. Die Literaturübersicht für das schwedische Reichsarchiv (Fellers 1989) widmet diesem wichtigen Aspekt keine zwei Seiten, geht vor allem auf alte Tinten ein und erwähnt nur die Zusammensetzung von Hochdruckfarben. Allerdings ist zu vermuten, dass hierzu doch einiges Wissen vorhanden ist, welches bei normalen Recherchen nicht oder nur durch Zufall gefunden wird. Es handelt sich dabei vor allem um Abschlussberichte zu Forschungsprojekten, die zwar prinzipiell öffentlich, jedoch in den Literaturdatenbanken häufig nicht gelistet sind. Darum wurde bereits Kontakt zur FOGRA (Forschungsinstitut für Medientechnologie e.V., Aschheim) aufgenommen, um gezielt nach abgeschlossenen Forschungsprojekten in diesem Bereich zu fragen. Das betrifft auch Fragen der Beständigkeit und Lesbarkeit heutiger Inkjet- und Laserdrucke sowie der Entwicklung der Schreibtechnologie allgemein für den Büro- und Verwaltungsbereich.

Neuere Entwicklungen in der Papiertechnologie bilden sich noch nicht in den Untersuchungen zur Alterungsbeständigkeit ab. Dazu gehört die ASA-Leimung, die in diesem Projekt Berücksichtigung finden soll. Zwar ist ASA ein im alkalischen Bereich eingesetztes Leimungsmittel, unterliegt selbst aber einer extensiven Hydrolyse, sofern die Prozessführung nicht sorgfältig

kontrolliert wird (Hodgson 1994). Des Weiteren betrifft dies den Trend zu gestrichenen und pigmentierten Papieren, den Einsatz von Enzymen, vor allem aber die fast unendlich breite Palette an Hilfsstoffen, die als Additive sowohl in der Papierherstellung als auch in der Druck- und der Druckfarbenindustrie zur Anwendung kommen.

Auch bekannte Prozesse, bei denen ein Einfluss auf die Alterungsbeständigkeit vermutet werden kann, etwa die Bleiche, wurden in der Literatur noch nicht systematisch dargestellt. Gleiches gilt für die gemeinsame Untersuchung von Proben verschiedener Zusammensetzung, obwohl in den Vorschriften zur Lagerung von Archivgut dem Problem der Kreuzkontamination Rechnung getragen wird. Möglichkeiten zur Beendigung der Hydrolyse als eine Alterungsreaktion sind gut untersucht, aber es findet sich kaum ein Beitrag, der sich mit der Bekämpfung der Oxidation und Autooxidation beschäftigt.

Folgender allgemeiner Forschungsbedarf wurde identifiziert:

1. Systematische Untersuchung des Einflusses von Tinten und Druckfarben auf den Alterungsprozess des Schriftguts,
2. Bestimmung des oxidativen und/oder hydrolytischen Potentials von Zersetzungsprodukten aus Papierrohstoffen, Papieradditiven und Druckfarben, ggf. auch Beiprodukten wie Verpackungen, Hefter, Hüllen, Ordner etc.,
3. Einfluss des Papierstrichs bzw. der Pigmentierung sowie den dabei verwendeten Rezepturen auf die Alterungsbeständigkeit, vor allem unter Berücksichtigung der dauerhaften Strichhaftung,
4. Durchführung eines Langzeitprojektes, evtl. gepaart mit dem Monitoring sensibler Schriften, bei dem Papiere und Schriftstücke zu Beginn des Projektes und nach realer Alterung in festen, langfristigen Zeitabschnitten (z. B. alle 25 Jahre) erneut beurteilt werden zum Abgleich der Erkenntnisse aus künstlicher und natürlicher Alterung. Dies liefere parallel zu dem bei (Zervos 2010) erwähnten Projekt für ASTM, könnte aber ergänzende Ergebnisse liefern und beim Monitoring helfen,
5. Einfluss von Kreuzkontamination während beschleunigter Alterungsversuche, wenn unterschiedliche Materialien gleichzeitig in einer Kammer behandelt werden,
6. Einfluss von enzymatischer Behandlung während der Papierherstellung bzw. der Druckfarbenherstellung auf den Abbau und die Alterung der Faserstoffe oder Papierinhaltsstoffe,
7. Anwendungsmöglichkeiten von Antioxidantien, um der oxidativen Alterung und der Vergilbung entgegenzutreten, incl. Untersuchung des Intervalls für einen möglichen optimalen Ligningehalt,

-
8. Verfolgung des chemischen Alterungsprozesses der Oxidation der Cellulose mit Hilfe der Detektion der sich in den Abbauprodukten bildenden C=O-Doppelbindungen über IR-Spektroskopie,
 9. Einfluss der Bleichprozesse (reduzierend/oxidierend), der eingesetzten Bleichchemikalien (Natriumdithionit, FAS (Formamidinsulfinsäure), Chlor, Chordioxid, Peroxide, Ozon etc.) sowie der Bleichsequenzen auf den Alterungsprozess von Schriftstücken.

Nicht alle dieser Aspekte sind für das vorliegende Projekt von primärer Bedeutung, im Sinne des in der Ausschreibung für die Vergabe des Projektes „Labest Papier“ geforderten Identifizierung an Forschungsbedarf werden sie aber hier mit aufgelistet. Dies betrifft die Punkte 6 bis 9 der Auflistung.

Manches ist für die Empfehlung eines geeigneten Papiers von hoher Wichtigkeit, kann aber wegen der dann auftretenden Fülle an Untersuchungen im Projekt nicht abgedeckt werden. Hierzu gehört insbesondere die Beurteilung des Einflusses verschiedener Tinten, verschiedener Additive und das Verhalten von gestrichenen Papieren (Punkt 1 bis 3). Auch ist Labest Papier nicht als Langzeitprojekt über 100 Jahre oder länger angelegt, weswegen auch Punkt 4 entfällt. Letzteres wird anderweitig schon bearbeitet, Ergebnisse werden allerdings im Verlauf des Projekts Labest Papier nicht vorliegen. Punkte 1 bis 3 werden bei Produktauswahl und ausgewählten Untersuchungsmethoden zumindest berücksichtigt, können jedoch nicht tiefergehend oder gar umfassend behandelt werden, da die Anzahl der zu untersuchenden Variablen sehr hoch ist. Lediglich dem Bereich der Kreuzkontamination (Punkt 5) wird im Laufe des Projektes mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Zumindest die Bedeutung, die diesem Punkt beizumessen ist, soll sich durch die gewählten Versuchsanordnungen besser klären.

2.6 Fazit

Bei der Literaturrecherche und Gesprächen mit Fachkreisen findet sich nach wie vor die These, dass langlebige Papiere so dicht wie möglich an den alten Hadernpapieren orientiert hergestellt werden sollten. Dies ist zunächst plausibel, weil die Hadernpapiere ihre Langlebigkeit in der Praxis über Jahrhunderte bewiesen haben. Der Einsatz von Hadern als Faserrohstoff stieße bei der Umsetzung auf Schwierigkeiten, weil Hadern als Rohstoffquelle für die heutige Massenproduktion nicht ausreichen. Allein in Deutschland betrug der Verbrauch an grafischen Papieren 7,1 Mio t (VDP 2020), eine Menge, die nur mit weiteren Faserstoffquellen produziert werden kann.

Fazit zum Rohstoff: Es müssen über Hadernpapiere hinaus weitere Faserquellen betrachtet werden. Dies geschieht, indem die Versuchsmatrix neben Papieren aus Hadern auch solche aus gebleichtem Zellstoff und ligninhaltigen Fasern enthält. Des Weiteren werden gestrichene

und ungestrichene Papiere berücksichtigt, wodurch sich die generelle Bandbreite der graphischen Papiere für Schriften und Druckerzeugnisse abbilden lässt. Das gewachsene Verständnis der Alterungsprozesse bei Cellulose, Hemicellulose und Lignin hilft, alternative Faserstoffe zu beurteilen. Mit dem gewachsenen Wissen wurde gleichzeitig deutlich, dass die Kriterien, nach denen die Langlebigkeit eines Papiers vorausgesagt werden soll, nicht immer eindeutige Ergebnisse liefern. Beurteilt man die Papiere nach ihrer Zusammensetzung und Ausgangslage wie in ISO 9706 festgelegt, so kann es passieren, dass Hadernpapiere die Kriterien nicht erfüllen (van DEVENTER et al. 1995). Beurteilt man Papiere nach der Stabilität ihre Materialfestigkeit wie in DIN 6738 festgelegt, so können die Randbedingungen bei der beschleunigten Alterung zu uneindeutigen Ergebnissen führen (Bansa 2002).

Fazit zu Aussage bezüglich alterungsbeständiger Papiere: Die Versuchsmatrix stützt sich im Wesentlichen auf die Norm ISO 9706 und den dort verlangten Kriterien, an denen sich die zu untersuchenden Papiere messen lassen. Dennoch ist diese Norm nicht das einzige Kriterium, auch die DIN 6738 kommt als zweite Säule bei der Untersuchung zum Tragen. Durch Hinzunahme von Messwerten über die in beiden Normen geforderten hinaus (längere Alterungszeiten, Messung von Doppelfalz widerstand und optischen Eigenschaften) wird die Aussagekraft beider Normen erweitert, andere Normen (ISO 20494, ANSI/NISO Z39.48, INEN 2728) werden so automatisch mit einbezogen. Die Breite der untersuchten Substrate bindet auch die auf Hadernpapiere abzielenden Normen ISO 11108 und UNI 10332 ein. Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der künstlichen Alterung können helfen, Versuchsrandbedingungen genauer zu definieren (Shahani 2001) und Versuchsergebnisse besser zu interpretieren. Hierzu sind die gängigen Alterungsnormen der ISO 5630-Reihe heranzuziehen und zu erweitern. Dennoch ist festzuhalten, dass die künstliche Alterung die natürliche Alterung nicht identisch nachbilden kann und das Verhalten des Papiers darum nicht exakt vorausberechnet werden kann.

Fazit zur künstlichen Alterung: Es soll nach den Bedingungen der ISO 5630-3 und 5630-5 gealtert werden. Hinzu kommt, dass die Proben teils in Alu-Folie verpackt sein sollen, teils frei hängen, teils mit anderen Proben gemischt werden. Dies führt zu Aussagen, wie sich unterschiedliche Materialien gegenseitig beeinflussen. Zusätzlich werden längere Zeitspannen der künstlichen Alterung untersucht, was weitere Erkenntnisse zum Ablauf von Alterungsprozessen erwarten lässt. Die Versuche sollen mit physikalischen und chemischen Messungen begleitet werden. Neben den in den Normen vorgesehenen Messungen werden auch weitere Tests durchgeführt, etwa Doppelfalzzahl und Nullreißlänge, zumindest zu Beginn und am Ende der Versuchsreihe. Bei der chemischen Beurteilung soll die Bestimmung der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, volatile organic compounds) als Messverfahren eingeführt

und ausprobiert werden. Hieraus wird erwartet, dass sich Schlüsse auf autooxidative Prozesse ziehen lassen. Das wäre ein Erkenntnisgewinn, der sich zur allgemeinen Beurteilung auch heute noch nicht existierenden Beiprodukte im Papier heranziehen ließe.

Im Rahmen des Projektes Labest Papier soll außerdem die Vergilbung bei verschiedenen Alterungstests mitgemessen werden. Zusätzlich würde auch der Weißgrad bei Tageslicht gemessen werden, um den Abbau von optischem Aufheller verfolgen zu können.



Abbildung 5 Fichte in Schweden, 9.500 Jahre alt (Quelle: Reuters, Alister Doyle)

Papier besteht heutzutage überwiegend aus Baumfasern. Das nach derzeitigem Wissenstand zweitälteste Lebewesen der Welt ist ein Baum, die 9.500 Jahre alte Fichte „Alt Tjikko“ in Schweden (WELT 2015). Diese beeindruckend lange Zeit beweist, dass die natürlichen Polymere in Baumfasern, wie sie im Papier verarbeitet werden, das Potential zur Langlebigkeit in sich tragen.

3 AP2: Methoden zur Handhabung typischer Schäden

Neben den in der Leitungsbeschreibung genannten und im AP1 zu recherchierenden Aspekten, die im Wesentlichen die Auslöser für chemische und physikalische Alterung des Bedruckstoffs Papier im Fokus haben, sind in diesem Kapitel Schäden, mit denen typischerweise über einen langen Lagerzeitraum zu rechnen ist, aufgeführt. Derartige Schäden resultieren nicht nur aus den chemischen, physikalischen und eventuell biologischen Alterungsprozessen, sondern auch aus dem Gebrauch der Dokumente, der Lagerung, eventueller Umlagerungen, beigefügten Artikeln wie Heftklammern, Umschläge, Ringordnern, Klarsichthüllen, Klebematerialien und der Art der Lagerung (stehen, liegend, komprimiert, lose). Im Extremfall können auch Großschadensereignisse, wie der Einsturz des Kölner Stadtarchivs am 3. März 2009 oder der Brand der Herzogin Anna Amalia Bibliothek am 2. September 2004, eine Rolle spielen. Auf die lange, im Projekt Labest Papier zu betrachtende Aufbewahrungsdauer sind auch Ereignisse wie Krieg, Diebstahl, Vandalismus und Vernachlässigung zu nennen. Der Blick auf derartige singuläre Ereignisse zeigt aber auch, welche erstaunlichen Möglichkeiten der Restaurierung bereits existieren.

3.1 Typische, zu erwartende Schäden an Papierdokumenten

Ein Schaden ist laut DIN EN 15898 definiert als „unvorteilhafte Veränderung“ (Allscher und Haberditzl 2019). Das Adjektiv ist wichtig, denn Veränderung allein ist demnach noch kein Schaden. Vor dem Hintergrund der in der Leistungsbeschreibung vom BASE geforderten „dauerhaften Unversehrtheit“ wäre dann einzubeziehen, dass Unversehrtheit nicht Unveränderlichkeit bedeuten darf, da diese nie gewährleistet werden kann (siehe auch Ausführungen in Unterkapitel 2.2.1). Ursache für Schäden sind gemäß gleicher Norm Schadfaktoren, von denen in einer Fußnote zehn genannt werden:

1. Physische Kräfte,
2. Diebe und Vandalen,
3. Feuer,
4. Wasser,
5. Schädlinge,
6. Luftschadstoffe,
7. Lichtstrahlung, Infrarotstrahlung, UV-Strahlung,
8. Unsachgemäße Temperatur,
9. Unsachgemäße relative Luftfeuchte,
10. Dissoziation (Zerfall aus unterschiedlichen Ursachen).

Einige diese Faktoren führen zu typischen Schäden, die aber im Zusammenhang mit zivil-nuklearen Dokumenten nicht erwartet werden müssen. Ein Beispiel wäre Feuer. Für Restauratoren ist das ein typischer, bekannter Schadensfall an Papierdokumenten. Es steht aber nicht zu befürchten, dass dieser Schadfaktor im Moment bei zivil-nuklearen Dokumenten eine große Rolle spielt. Im Gegenzug kann davon ausgegangen werden, dass zu erwartende Schäden typischerweise schon vorgekommen sind und daher eine Art des Umgangs damit entwickelt wurde (siehe Kapitel 3.2 und 3.3).

Manche Schäden sind zu erwarten, weil eine große Anzahl an Dokumenten über einen langen Zeitraum betrachtet wird. Physische Schäden an Dokumenten z. B. sind mit hoher Wahrscheinlichkeit vorhanden. Auch die Auswirkung auf das Dokument kann sehr unterschiedlich sein. Schmutz, Vergilbung oder ähnliches kann als Schaden vorhanden sein, aber die Gebrauchsfähigkeit des Dokuments hinsichtlich Lesbarkeit und physischer Nutzbarkeit ist unter Umständen nicht beeinträchtigt. Insgesamt mündet die Betrachtung dieser Aspekte zu einer Einstufung des voraussichtlichen Handlungsbedarfs und fließt auch in die im Rahmen des Projektes „Labest Papier“ zu erstellenden Datenbank ein.

Für die folgende, alphabetische Aufstellung möglicher Schäden dienen als Basis ein von der Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts (KEK) herausgegebenes Glossar (Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts 2021), zusammen mit der (DIN ISO 11799) und der (DIN SPEC 67701) sowie auf der Web-site des Landschaftsverbands Rheinland – Archivberatungs- und Fortbildungszentrum (LVR-AFZ) befindliche Informationen (LVR-AFZ 2021). Des Weiteren werden in Gesprächen mit Archivaren, aus Webseiten von Restauratorinnen und Restauratoren sowie von Mitarbeitern des BASE selbst erlangte Erkenntnisse hier aufgeführt ((Schaffrath 2020), (Leopold 2020)).

Aufgeführt sind zunächst Schäden, mit denen im Projekt Labest Papier zu rechnen ist, ohne immer beziffern zu können, wie groß der Anteil und das Ausmaß dieser Schäden ist, auch, wenn sie bisher noch nicht beobachtet wurden. Einige Schäden wurden vom BASE genannt und gezählt (Leopold 2020). Die Zahl wird als Prozentangabe bezogen auf die Summe der genannten Schäden (534 Nennungen insgesamt) angegeben. Dabei wurden genannte, ähnliche Schäden (z. B. Rost infolge Büroklammern, Rost infolge Heftklammern oder Rost infolge Metallschienen für Hängeregister) zusammengefasst. Wurden die Schäden bisher nicht beobachtet, wird dies als „keine Nennung“ vermerkt. Sind Schäden als Synonym zu verstehen (z. B. Blasigkeit, Cockling und Verwellung), so wird die Prozentzahl jedes Mal genannt. Zu bedenken ist allerdings, dass dies nur eine erste Schadensaufnahme und noch keine statistisch belastbare Schadenserhebung ist. Jedoch verschaffen diese Zahlen einen vorläufigen Eindruck.

Weitere Schäden an Papier oder Druckfarbe, die an Papierdokumenten des BASE nicht anzunehmen sind, werden im Kapitel 3.4 genannt. Fett geschriebene Begriffe sind entweder in diesem Kapitel oder im Kapitel 3.4 aufgelistet.

Abklatsch: Unbeabsichtigtes Durchschlagen von gemalten oder gedruckten Farben auf die darüber- oder darunterliegende Seite innerhalb eines Buches oder eines Papierstapels. Oftmals sind lediglich einzelne Farben bzw. Pigmente die Ursache. Abklatsch kann auch eine Folge eines **Feuchtigkeitsschadens** sein oder als Folge von Korrekturflüssigkeit auftreten (1,3 % der vom BASE genannten Schäden).

Adhäsionsverlust: Haftnotizen, Heftstreifen, Tesafilm, Lochverstärker, Klebeetiketten oder ähnliches sind häufig genutzte Büroartikel, die ergänzende Informationen zum Dokument beitragen sollen oder dem Dokumentenzusammenhalt dienen. Bei allen Kleberstoffapplikationen jedoch muss mit einem Verlust der Klebekraft über die Zeit gerechnet werden. Bei der Wiedernutzung von Dokumenten nach langer Zeit der Einlagerung kann es somit passieren, dass eine Adhäsion nicht mehr gegeben ist und z. B. Notizen aus dem Dokument fallen, ohne dass ihre gewollte Position bekannt ist (12 % der vom BASE genannten Schäden; siehe auch **Kohäsionsverlust**).

Auftrennung: Oft werden mehrere Blätter zu einem Dokument zusammengefügt oder mehrere Dokumente zu einer Einheit zusammengefasst. Durch **Rost**, **Risse**, Verlust von Klebewirkung (**Adhäsionsverlust**) oder sonstige **mechanische Schäden** kann dieser Zusammenhalt verlorengehen (5,3 % der vom BASE genannten Schäden).

Ausblutung: Unter Feuchtigkeitseinwirkung können Farbflächen oder Tintenschriften auslaufen und das Schriftbild, die Malereien oder Stempel schädigen. Bei der **Massenentsäuerung** kann dieser Effekt des Ausblutens als Nebenwirkung auftreten (keine Nennung).

Blasigkeit: Die Ursache für Blasigkeit kann die Einwirkung von Feuchte oder Trockenheit sein. Die Faserverteilung im Papier ist nicht vollkommen homogen, es finden sich Stellen mit höherer und Stellen mit niedrigerer Faserkonzentration. Hält man ein Papierblatt gegen das Licht, sieht man dies als mehr oder minder wolkige Struktur. Ein im Feuchtegleichgewicht befindliches Papier liegt glatt und ohne Verwerfungen da. Ändert sich die Feuchte, dann quellen die Fasern (Feuchtezunahme) oder schrumpfen (Feuchteabnahme). An Stellen unterschiedlicher Faserdichte tun sie dies unterschiedlich stark. Im betroffenen Blatt sieht dies aus wie blasige Verwerfungen. Kann das Papier nicht an jeder Stelle frei schrumpfen oder quellen (z. B. durch partielle Pressung infolge der Lagerbedingung) kann es statt zur Blasigkeit zu **Verwellungen** kommen. Da Schrumpfung und Quellung mit einer Hysterese verlaufen, bilden sich Blasen bei Rückkehr des alten Feuchtezustands nicht zurück. Das Papier muss dann aktiv geglättet werden (12 % der vom BASE genannten Schäden).

Bücherwurm: (Aniela Bez 2021) Der bekannteste **Schädling** in der Papier- und Buchrestaurierung ist wohl der sog. Bücherwurm oder **Holzwanne**, der eigentlich gar kein Wurm ist. Es handelt es sich dabei um die Larven des gemeinen Nagekäfers (lat.: *Anobium punctatum*). Die Larven ernähren sich hauptsächlich von Holz, aber auch von Papier, wodurch die Fraßgänge entstehen. Die typischen Löcher sind die Ausfluglöcher, die entstehen, wenn sich die Larve zum Käfer verpuppt und ausfliegt. **Fraßschäden** des Nagekäfers sind Schadensbilder, welche in der Buchrestaurierung sehr häufig vorkommen. Meist handelt es sich bei den Buchrestaurierungen mit Schädlingsbefall um einen alten Befall. Das heißt, es finden sich keine lebenden Larven mehr im Buch, sondern nur noch altes Holzmehl und die **Fraßschäden** (keine Nennung).

Cockling: Cockling ist der in Fachkreisen der Papierindustrie häufig verwendete Begriff für **Blasigkeit** (12 % der vom BASE genannten Schäden).

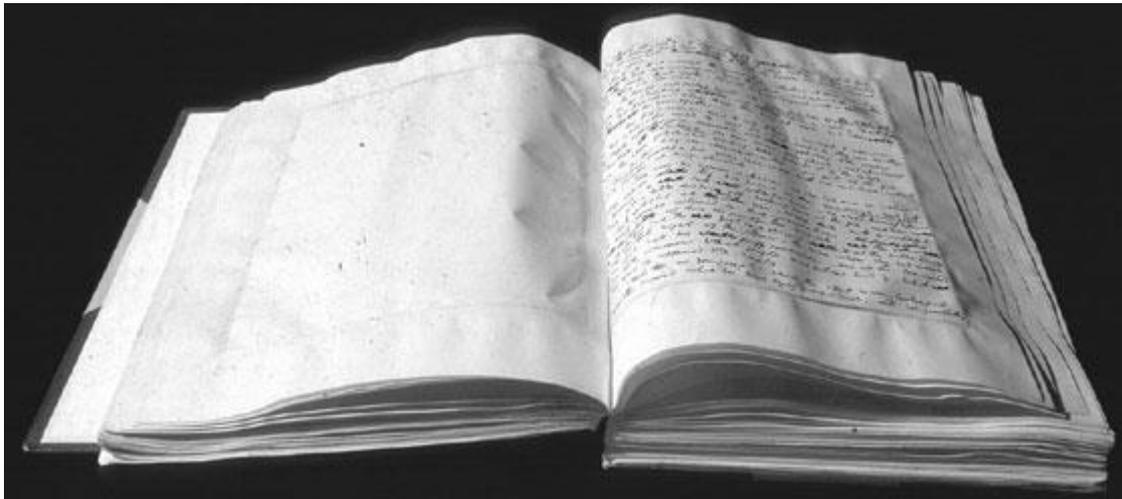


Abbildung 6 Cockling an einem gebundenen Buch (Quelle: V&A Photographic Studio)

Einbandschaden: Bucheinbände sind oft großer mechanischer Belastung ausgesetzt und können mit der Zeit beschädigt werden. Häufig treten Schäden an Kanten oder Verzerrungen des Einbands auf. Die Materialzusammensetzung und damit die Schadensausprägung ist vielfältig: Leder-, Pergament-, Gewebe- und Pappeinbände sind am häufigsten betroffen. Tendenziell besteht diese Gefahr auch bei Aktenordnern (keine Nennung).

Falten: siehe **Knicke** (11,8 % der vom BASE genannten Schäden)

Farbabrieb: Dies ist kein eigentlicher Alterungsschaden. Farbe, die nicht gut genug mit dem Träger (hier: Papier) verbunden wurde, kann sich durch Reibung von diesem lösen. Allerdings fällt dieser Fehler schon beim Gebrauch des Produktes auf und führt in der industriellen Praxis zu Reklamationen, wird somit schnell erkannt und beseitigt.

Feuchtigkeitsschaden: Dies ist im Allgemeinen ein **Lagerschaden** und auf unsachgemäße Klimatisierung bzw. Lager- oder Transportbedingung zurückzuführen. Das Ausmaß ist weniger

massiv als bei **Wasserschäden**, die Folgen sind jedoch ähnlich (**Schimmelbefall, Blasigkeit/Cockling, Flecken, Verwellungen**), der Umgang damit gleich (12 % der vom BASE genannten Schäden).

Flecken: Durch Einwirkung von außen, z. B. dem Verschütten einer Flüssigkeit oder der Kontamination mit Fett oder Öl, kann es zu Flecken im Dokument kommen, die die Lesbarkeit beeinträchtigen. Auch **Rost** kann Ursache für Flecken sein. Flecken sind auch eine mögliche Auswirkung von **Feuchteschäden**, z. B. als Stockflecken wegen **Schimmelbefall** oder durch **Abklatsch** bzw. **Ausbluten** (12 % der vom BASE genannten Schäden).

Fraßschaden: Auf einen biologischen Befall an schriftlichem Kulturgut zurückzuführender Schaden. Tiere oder Mikroorganismen beschädigen Schriftgut, indem sie sich vom Beschreibstoff selbst oder von den Einband- und Schutzmaterialien ernähren. **Farb-, Tinten- und Säurefraß** sind hiervon zu unterscheiden: Bei diesen Schadensbildern handelt es sich um chemische Abbauprozesse, deren Ursache in der Materialität selbst liegt (keine Nennung).

Heftungsschaden: Auflösung der Heftungen z. B. von Papierbögen aufgrund mechanischer Belastungen. Eine Folge kann der Verlust des Ordnungszusammenhangs oder gar ganzer Schriftstücke sein (siehe auch **Auftrennung**; 5,3 % der vom BASE genannten Schäden).

Holzwurm: siehe **Bücherwurm** (keine Nennung).

Knicke: Diese gehören zu den **mechanischen Schäden** und kommen durch unsachgemäßen Transport bzw. Lagerung zustande. Auch sind sie ein typischer **Nutzungsschaden** (11,8 % der vom BASE genannten Schäden).

Kohäsionsbruch: Im Gegensatz zum **Adhäsionsbruch**, bei dem eine gewünschte Klebewirkung verloren gegangen ist, findet beim Kohäsionsbruch die Trennung innerhalb der Blattebene (delaminieren) eines Dokuments statt. Dies kann die Folge von **Verklebung** oder **Verblockung** sein (keine Nennung).

Korrosion: Von der Oberfläche ausgehende meist unerwünschte und im Allgemeinen von selbst ablaufende komplexe Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebung, die eine messbare Schädigung oder Zerstörung von Werkstoffen bzw. Werkstoffschichten bewirkt. Dies kann zu Stoffverlusten führen, z. B. bei **Farbfraß** oder **Tintenfraß**, oder zu **Flecken**, etwa durch **Rost** (11,6 % der vom BASE genannten Schäden)

Lagerungsschaden: Sämtliche unspezifischen Folgen schlechter und unsachgemäßer Lagerungsbedingungen. Zu den häufigsten Folgen zählen mechanische Schäden am Einband, **Ver- schmutzungen**, **Schimmelpilzbefall** oder andere **Feuchtigkeitsschäden** (keine Nennung, aber in verschiedenen Schadensbildern enthalten).

Lichtschaden: Zu starker Lichteintrag führt bei vielen Materialien zu einem Ausbleichen der Schrift oder einer **Vergilbung** des Papiers. **Säurefraß** kann durch starke Lichteinstrahlung verstärkt werden. Lichtschäden stellen einen Teilaspekt von **Lagerungsschäden** dar (11,6 % der vom BASE genannten Schäden).

Mechanischer Schaden: Beschädigungen, die beim Ausheben, Reponieren, Transport, der Nutzung oder der unsachgemäßen Lagerung von Schriftgut entstehen. Häufig vertreten sind **Risse**, **Knicke** oder Stauchungen an Akten oder **Einbandschäden** an Drucken oder gebundenen Handschriften (Oberbegriff für mehrere Schadensbilder; in Summe 36,1 % der vom BASE genannten Schäden).

Nutzungsschaden: Sämtliche Schäden, die allgemein bei der Nutzung von Schriftgut entstehen. Bei großvolumigen Bänden können z. B. über das Aufklappen und Blättern mechanische Schäden entstehen. Großformatige Karten erhalten z. B. bei unsachgemäßem Gebrauch **Risse** oder **Knicke** (Oberbegriff für mehrere Schadensbilder, inklusive **mechanischer Schaden**; in Summe 38,6 % der vom BASE genannten Schäden).

Papierfischchen: (lateinisch: ctenolepisma longicaudata) Diese besiedeln nicht nur Industrie-Papierlager, sondern bedrohen auch Bücher und Dokumente in Archiven, Bibliotheken und Museen. Da sie sich anders als die übrigen Fischchen (z. B. den bekannten **Silberfischchen**) und die meisten anderen papierfressenden Insekten im trockenen Magazinklima (um 50 Prozent relative Luftfeuchte) optimal vermehren, werden sie im Gegensatz zu Erstgenannten nicht nur als **Lästlinge**, sondern als **Schädlinge** aufgefasst (Wikipedia 2020b) (keine Nennung).

Riss: Mechanische Beschädigung eines Schriftstücks. Ein durch Einreißen entstandener Spalt z. B. an einer Papierkante ist als Schadensbild häufig vertreten (11,8 % der vom BASE genannten Schäden).

Rost: Überall, wo Eisen zum Einsatz kommt, muss mit dem Auftreten von Rost gerechnet werden. Dies können Heftklammern, Büroklammern, Metallbügel in Ordnern, Nieten, Metallschienen an Hängeregistern, Biegelaschen in Schnellheftern etc. sein. Bei sachgemäßer Lagerung in klimatisierten Räumen ist diesbezüglich nur sehr langsam (innerhalb von Jahrzehnten) mit Schäden zu rechnen, jedoch lässt sich Rost auf Dauer nicht vermeiden. Die Auswirkungen sind **Flecken**, nicht oder schlecht zu öffnende Ordner, im schlimmsten Fall Verlust einer Zusammenfügung verschiedener Blätter oder Dokumente (11,6 % der vom BASE genannten Schäden).

Säurefraß: Chemischer Abbauprozess des Papiers, dessen Ursache die materialinhärente Säure in ligninhaltigem, vor allem aber sauer geleimtem Papier ist. Dieses Papier wurde vor allem ab 1850 in großen Mengen verwendet; der Großteil der Archiv- und Bibliotheksbestände ab dieser Zeit ist daraus hergestellt und deshalb von Säurefraß betroffen. Ab 1970 kamen

dann immer mehr neutral geleimte Papiere auf. Seit 1990 kann man davon ausgehen, dass keine sauer geleimten grafischen Papiere mehr benutzt wurden. Der Säurefraß ist katalytisch, d. h. vorhandene Säure führt zum Abbau der Celluloseketten, ohne dass die Säure dadurch verbraucht wird. Da als Abbauprodukte weitere Säuren entstehen können, verstärkt sich der Prozess tendenziell. Durch **Massenentsäuerung** kann der Vorgang stark unterbunden werden, jedoch nicht vollständig gestoppt. Auch bei Vorliegen einer alkalischen Reserve, können entstehende Säuren nicht schnell genug gebunden werden, um gar keinen Schaden hervorzurufen.

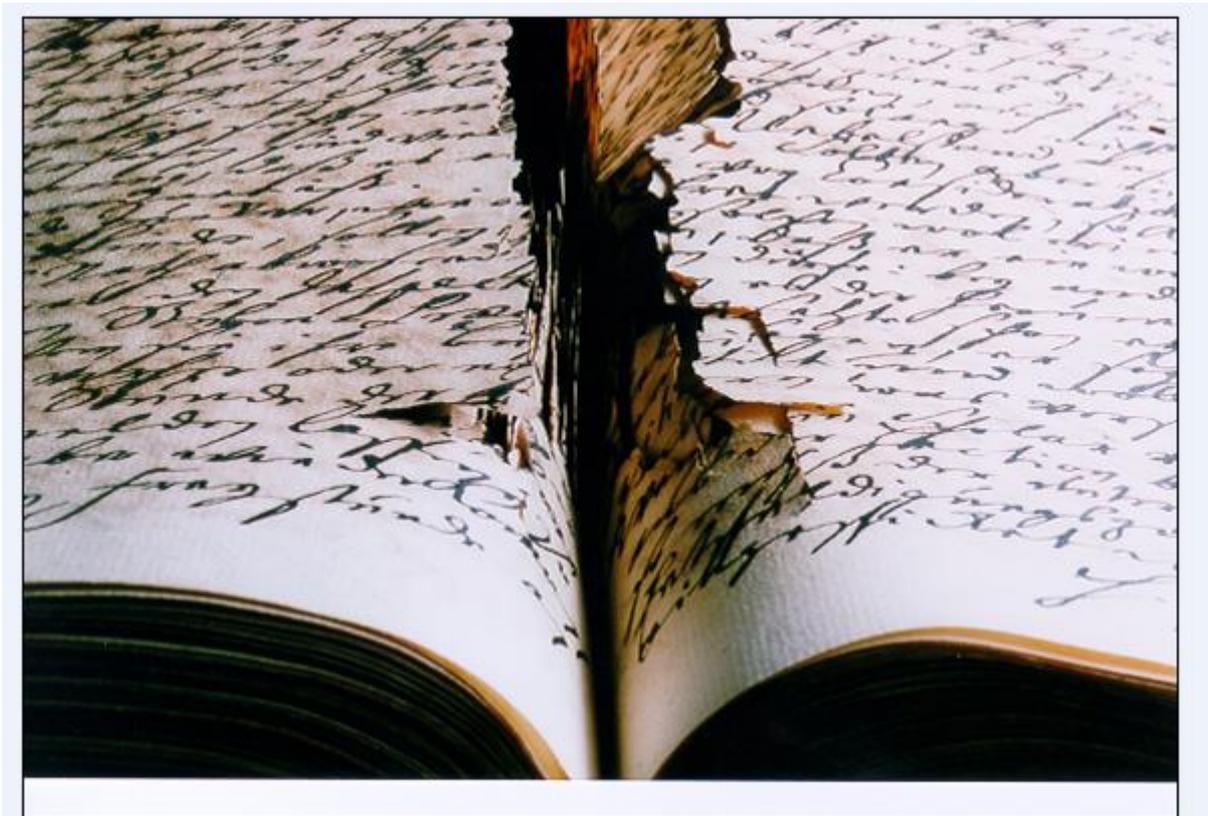


Abbildung 7 Von Säurefraß betroffenes Papier (Quelle: Wikipedia – Papierzerfall)

Säureschaden: Beschädigung von Schriftgut, die meist auf eine säurehaltige Verpackung aus sauer geleimtem Papier mit Holzstoffanteil zurückzuführen ist. In dieser Außeneinwirkung ist der Säureschaden vom **Säurefraß** zu unterscheiden: Bei letzterem liegt die Ursache für den chemischen Abbauprozess im Material selbst (keine Nennung).

Schädling/Schädlingsbefall: Vielfältige Schädlinge wie Mikroorganismen, Insekten oder Nagetiere können durch Fraß oder Ausscheidungen schriftliches Kulturgut zerstören. Das **Integrated Pest Management** (IPM; siehe Kapitel 3.3.1) hilft, Schädlingsbefall frühzeitig zu erkennen und zu bekämpfen. Aus Archiven wird berichtet, dass zunehmend ein Befall mit **Papierfischchen** zu beobachten ist (keine Nennung). Letzteres liegt daran, dass diese Spezies

sich ausgerechnet bei den aus Alterungsgründen empfohlenen Lagerbedingungen sehr wohl fühlen und vermehren.

Schimmelpilzbefall: Ein meist aufgrund ungünstiger Klimabedingungen auftretender Befall mit Schimmelpilzen stellt Archive und Bibliotheken vor besondere Herausforderungen: Schimmelpilze zersetzen nicht nur Schriftträger, sondern stellen auch für Nutzerinnen und Mitarbeiter eine gesundheitliche Bedrohung dar. Befallenes Schriftgut kann unter entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen mittels der Trockenreinigung behandelt werden. Ein Wiederbefall wird durch konstante **Klimaregulierung** verhindert, was aber unter Umständen dem **Schädlingsbefall** in Form von **Papierfischchen** Vorschub leisten kann (keine Nennung).

Silberfischchen: (lateinisch: *Iepisma saccharina*) Diese sind den **Papierfischchen** sehr ähnlich, bilden aber geringe Gefahr für Papier (keine Nennung).

Sonstige Schäden: Neben den Schäden am Papier können auch Schäden an begleitendem Büromaterial auftreten. Z. B. werden Prospekthüllen mit der Zeit opak und brüchig, gleiches gilt für Schnellhefter, Schriftgutbehälter und andere Utensilien aus Plastik (2,4 % der vom BASE genannten Schäden).

Transparentpapier: Dieses wird, ähnlich wie Pergaminpapier, häufig für Baupläne und -zeichnungen verwendet. Es gibt unterschiedliche Transparentpapiere mit voneinander abweichenden Eigenschaften, die meisten altern jedoch schneller als andere Papiere und sind stärker vom **Säurefraß** betroffen. Dies führt bei den oft großformatigen Objekten schnell zu mechanischen Schäden durch **Versprödung** (7,5 % der vom BASE genannten Schäden).

Überfüllung: Schäden können durch unsachgemäße Vorgehensweise provoziert werden. Wird ein Ordner oder ein anderer Schriftgutbehälter überfüllt, drohen **Nutzungsschäden** (0,9 % der vom BASE genannten Schäden).

Verblassen: Thermopapier z. B. ist ein spezielles Druckpapier, das unter Einwirkung von Wärme Farbstoffe ausbildet und von speziellen Thermodruckern bedruckt werden kann. Eine häufige Anwendung sind Kassenbons. Thermodrucke verblassen sehr schnell, je nach Qualität bereits nach einigen Wochen. Direkte Lichteinstrahlung beschleunigt den Vorgang. Für die dauerhafte Aufbewahrung kommen nur Reproduktionen infrage. Ähnliches gilt für Selbstdurchschreibepapiere, wie sie für Lieferscheine, Quittungen etc. verwendet werden. Hinzukommen Vervielfältigungen aus der Hektographie (auch als Ormig-Kopie oder Matrizendruck bezeichnet). Ebenso sind Blaupausen hiervon betroffen, allerdings ist das Erscheinungsbild so, dass der Hintergrund dunkler wird, nicht die Schrift heller. Auf Dauer verschwindet jedoch der Kontrast und die Zeichnungen sind nicht mehr lesbar. Derartige Schriften sollten möglichst dunkel gelagert werden, um den Vorgang zu verlangsamen. Zur Sicherung der Information ist eine zusätzliche Speicherung (über Verfilmung, Digitalisierung, Reproduktion) sinnvoll (9,6 % der

vom BASE genannten Schäden). Auch Photographien verblassen. Im Gegensatz zu den Thermopapieren ist aber hier durch bildanalytische Bearbeitung eine zumindest teilweise Wiederherstellung der Information möglich.



Abbildung 8 verblasstes Foto nach und vor der Bearbeitung (Quelle: Lichtbildklinik.de)

Verblockung: Feuchtigkeit, **Schimmelpilzbefall** und Druck können dazu führen, dass sich Papierseiten blockhaft miteinander verbinden. Häufig ist es sehr schwierig, verblockte Seiten mechanisch wieder zu trennen. Schollen- und Fragmentbildung oder andere irreversible schwere Schäden sind die Folge. Verblockung ist sehr ähnlich oder auch bedingt durch **Verklebung** (2,4 % der vom BASE genannten Schäden).

Verbräunung: Insbesondere vor 1970 hergestelltes Transparentklebeband wird durch Alterung des Klebers braun und undurchsichtig (opak) (Aniela Bez 2021). Der Kleber wird brüchig, seine **Kohäsion** geht verloren. An den Kontaktstellen zum Papier oder zur Druckfarbe kann es zu **mechanischen Schäden** kommen. In manchen Literaturstellen wird Verbräunung synonym zu **Vergilbung** verwendet, meist dann, wenn der Vergilbungsprozess soweit fortgeschritten ist, dass die Farbe eher als braun denn als Gelb anzusehen ist (keine Nennung).

Vergilbung: Wenn Papier dem Tageslicht, insbesondere UV-Strahlung, ausgesetzt wird, dann ändert sich seine Farbe ins Gelblich/Bräunliche. Diesen Vorgang nennt man Vergilbung. Es gibt zwei wesentliche Ursachen. Am stärksten ist Vergilbung an Papieren zu beobachten, die Lignin enthalten. Hier wird durch Lichteinwirkung das Ligninmolekül so verändert, dass es gelblich wird. Dies betrifft die holzhaltigen Papiere, z. B. Recyclingpapier, Zeitungen, Magazine und Verpackungspapiere. Die holzfreien Papiere sind oft mit optischem Aufheller versetzt. Dieser zersetzt sich durch UV-Strahlung mit der Zeit, wodurch der Blauwert des Papiers abnimmt, was komplementär eine Zunahme des Gelbwertes bedeutet (11,6 % der vom BASE genannten Schäden).



Abbildung 9 vergilbte Zeitung (Quelle: Prof. Blumes Medienangebot: Papier)

Verklebung: Unter Feuchtigkeitseinwirkung löst sich der Leim von Papieren und verursacht Verklebungen der Seiten. In Extremfällen führt dies zur **Verblockung** von Büchern und Akten. Leichte Verklebungen können mechanisch gelöst werden. Ein gleiches Schadensbild zeigt sich, wenn bei gestrichenen Papieren das Bindemittel aufweicht und so zum Verkleben der Seiten führt (2,4 % der vom BASE genannten Schäden).

Verschmutzung: Aufliegender Schmutz auf schriftlichem Kulturgut kann viele Ursachen haben. Neben Hausstaub ist eine Verschmutzung durch Baustaub, Luftverschmutzung, Transport, Nutzung etc. möglich. Um die Gefahr von **Schimmelpilzbefall** möglichst gering zu halten, ist z. B. die regelmäßige Reinigung der Magazinräume notwendig (keine Nennung).

Versprödung: Durch den Abbau des Cellulosepolymers infolge von Säuren (**Säurefraß**) kommt es zu einer Abnahme der mechanischen Festigkeit und zu einer Abnahme der Dehnbarkeit. Infolgedessen zerbricht das Papier schon bei bestimmungsgemäßer Nutzung, etwa dem Umblättern von Seiten.

Verwellung: Papierdokumente sollen im Allgemeinen einen kompakten Block bilden, der überall die gleiche Dicke hat und plan auf einer ebenen Fläche aufliegt. Stapelt man Dokumente unterschiedlichen Formats übereinander oder lagert man sie gepresst, so kann es durch unterschiedliche Druckverteilung zu Verformungen kommen, die exakte Planlage ist nicht mehr gegeben. Eine weitere Ursache für Verwellung kann die Einwirkung von Feuchte oder Tro-

ckenheit bei gleichzeitiger Möglichkeit einer partiellen Schrumpfung oder Quellung der Papierfasern sein. Diese Art der Verwellung ist ähnlich dem Schadensbild **Blasigkeit** bzw. **Cockling** (12 % der vom BASE genannten Schäden).

Fasst man die Nennungen der Schäden durch das BASE unter verschiedenen Gesichtspunkten zusammen, so ergibt sich ein besserer Überblick. Eine erste Clusterung kann infolge der Entstehung eines Schadens durch Nutzung oder Lagerung vorgenommen werden. Schäden, die vielleicht durch den Transport oder während der Einlagerung stattgefunden haben (z. B. Knicke, Risse), werden der Nutzung zugerechnet. Lagerung meint somit Schäden, die entstanden sind, während das Schriftgut unbewegt im Magazin lag. So zusammengefasst machen Nutzungsschäden 49,4 % aller genannten Schäden aus, Lagerschäden 50,6 %.

Eine weitere Clusterung erfolgt nach Erscheinungsbild des Schadens in optische (Vergilbung, Flecken etc.), mechanische (Risse, Knicke, Verwellungen etc.), biologische (Schimmel, Schädlinge, Tierfraß etc.) und chemische Schäden (Säurefraß, Farbfraß etc.). Eine Mehrfachnennung ist hier möglich, da z. B. Säurefraß ein chemischer Prozess ist, der einen mechanischen Schaden in Begleitung hat; Rost ist ein chemischer Prozess, der optische Flecken zur Folge hat. Die Summe der Prozentangaben übersteigt deswegen 100 %. Darin sind optische Schäden in 41,0 % der Schadensnennungen vertreten, mechanische Schäden ebenfalls zu 77,3 %, biologische Schäden wurden nicht beobachtet, 67,6 % der Schäden waren auf chemische Ursachen zurückzuführen.

Die dritte Clusterung betrifft die geschädigte Komponente, nämlich Papier, Farbe oder Sonstiges (Büroartikel wie Prospekthüllen, Tesafilm oder Behälter). Auch hier sind Mehrfachnennungen möglich, z. B. wirken sich Flecken sowohl auf das Papier als auch auf die Farbe aus. Demnach betreffen 53,6 % der vom BASE genannten Schäden das Papier, 22,8 % die Farbe und 40,8 % Sonstiges.

Tabelle 2 Clusterung der vom BASE genannten Schäden

	Schadens-Cluster	Anteil von in Summe 534 Nennungen
Entstehung	Lagerung	50,6 %
	Nutzung und Transport	49,4 %
Erscheinungsbild	Optisch	41,0 %
	Mechanisch	77,3 %
	Chemisch	67,6 %
	Biologisch	0 % (keine Nennung)
Geschädigte Komponente	Papier betreffend	56,3 %
	Druckfarbe/Tinte betreffend	22,8 %
	Sonstiges betreffend	40,8 %

3.2 Formulierung begründeter Empfehlungen zum Umgang mit zu erwartenden Schäden an Papierdokumenten

Es muss an dieser Stelle betont werden, dass gemäß den Schadensnennungen durch das BASE in Summe etwa die Hälfte der Schäden auf Nutzung oder Transport zurückzuführen, also schon vor der Einlagerung entstanden sind. Das Ausmaß der Schäden ließe sich deutlich reduzieren, wenn schonender Gebrauch des Papiers und sachgemäße Lagerung von Anfang an auf eine möglichst lange Lebensdauer der Schriftstücke ausgerichtet wäre. Dabei wäre im Sinne eines Dokumentenmanagements schon im Vorfeld darauf zu achten, dass schädigende Büroartikel wie Metallklammern, Klarsichthüllen, Klebematerial, Klebebänder oder Korrekturflüssigkeiten gar nicht erst verwendet oder vor einer Einlagerung entfernt und signifikant vorgeschädigte Dokumente schon dupliziert würden. Insofern zeigt sich, dass die allerersten Maßnahmen im Dokumentenmanagement darauf ausgerichtet sein müssen, das Auftreten von Schäden überhaupt zu vermeiden. Dieser Tenor zieht sich auch durch die einschlägigen Normen, Literaturstellen, Webseiten und Gespräche, wie bereits zitiert. Der Schulung aller betroffenen Personen kommt dabei großes Augenmerk zu. Ein guter Überblick über Vermeidung und Umgang mit Schäden findet sich in (Kobold und Moczarski 2010).

Die DIN EN 15898 „Erhaltung des Kulturerbes – Allgemeine Begriffe“ sowie die DIN SPEC 67701 „Bestandserhaltung für Archive und Bibliotheken“ (zitiert aus (Allscher und Haberditzl 2019)) unterscheiden in:

1. Bestandserhaltung,
2. Konservierung,
 - a. präventive Konservierung,
 - b. stabilisierende Konservierung,
3. Restaurierung und
4. Reparatur.

Bestandserhaltung umfasst alle Maßnahmen oder Gegebenheiten, die aktiv oder passiv dazu dienen, die zu verwahrenden Dokumentenbestände auf Dauer zu erhalten und sie für die Nutzung durch künftige Generationen zu bewahren. Mehrere Normen, die den Sammelwerken (DIN-Taschenbuch 343 2018) und (Allscher und Haberditzl 2019) entnommen werden können, geben Empfehlungen zum Bau von Archiven, inklusive Auswahl des Standorts hinsichtlich zu erwartender Naturereignisse (Erdbeben, Überschwemmungen) oder menschlicher Eingriffe (Nähe von emittierenden Quellen, Krisengebiete), zu Klimatisierung, Beleuchtung, Schulung, Planungs- und Entscheidungsprozesse, Quarantäne von Dokumenten bei Schädlingsbefall, Notfallvorsorge etc.

Konservierung ist ein Unterpunkt der Bestandserhaltung und bezeichnet jedes Interventionsverfahren, das angewendet wird, um Schäden an einem Dokument zu verhindern, aufzuhalten oder zu verzögern. Entsprechend wird unterschieden in „präventive Konservierung“ und „stabilisierende Konservierung“. Erstere zielt darauf ab, einen invasiven Eingriff am Dokument unnötig zu machen, indem zu erwartenden Schäden vermieden oder minimiert werden. Letztere bezeichnet Maßnahmen der Begrenzung eines bereits eingetretenen Schadens.

Restaurierung (zitiert nach (Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts 2021), Glossar) bezeichnet Maßnahmen zur Wiederherstellung eines beschädigten Objekts. Diese können sich je nach Art und Ausmaß des festgestellten Schadens auf die Ergänzung von verlorengangenen Material beschränken oder auch einen tiefen Eingriff in die Struktur eines Objekts bedeuten. Restaurierung zielt auf die Sicherstellung und Wiederherstellung der Gebrauchsfähigkeit einzelner Objekte, wobei der Charakter des Originals durch weitgehende Erhaltung der originalen Substanz bewahrt werden soll. Restaurierungen sollten nach geltenden Standards reversibel sein, um Restaurierungsschäden zu verhindern und nachkommenden Generationen die Anwendung neuer Restaurierungsmethoden zu ermöglichen.

Reparatur bezeichnet eine Maßnahme, die darauf abzielt, die Funktionalität eines Objektes und/oder sein Erscheinungsbild wiederherzustellen. Von der Restaurierung unterscheidet sich

die Reparatur dadurch, dass bei ihr keine Rücksicht auf einen historischen Kontext genommen werden muss, d. h. es müssen keine alten handwerklichen Techniken angewendet oder historische Materialien verwendet werden.

3.2.1 Umgang mit spezifischen Papiersorten inkl. Recyclingpapier ab 1960

Allgemein können Papiere gemäß dem Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP) in vier Hauptgruppen unterteilt werden (VDP 2020):

1. Graphische Papiere: Dies sind Druck- und Büropapiere. Bei den meisten Papieren, um die es sich im Projekt Labest Papier dreht, wird es sich um diese Kategorie an Papieren handeln. Die Gruppe umfasst:
 - a. Holzfremde Papiere (d. h. das Lignin wurde entfernt), wie sie als weißes Kopierpapier gemäß ISO 9706 zur Anwendung kommen, aber auch in Broschüren verwendet werden, gestrichen wie ungestrichen.
 - b. Holzhaltige Papiere (diese enthalten mehr als 5 % Fasern, bei denen das Lignin nicht entfernt wurde), die als Recyclingpapier, in Zeitungen, Magazinen und Broschüren – letztere gestrichen und ungestrichen – vorkommen.
2. Verpackungspapiere: Die sind Wellpappen, Faltschachteln, Einwickelpapiere und ähnliches, wie sie zur Aufbewahrung von Dokumenten herangezogen werden. Verpackungspapiere sind überwiegend holzhaltig und bestehen zu einem hohen Anteil aus Recyclingfasern. Jedoch schreibt die DIN ISO 16245 für manche Schachteln oder Archivmappen (Typ A) die Einhaltung der Kriterien nach ISO 9706 vor, d. h. diese Materialien dürfen nicht holzhaltig oder gestrichen sein.
3. Tissue: Diese Hauptgruppe spielt im Hygienebereich eine Rolle, nicht aber bei Dokumenten.
4. Spezialpapiere: Hierzu gehören z. B. Thermopapiere, Selbstdurchschreibepapiere, Transparentpapiere, Blaupausen, Geldscheine oder andere Wertpapiere, Landkarten, Pässe, Fotopapier etc. Wie die Aufzählung zeigt, ist mit dem Auftreten derartiger Papiere im Projekt Labest Papier zu rechnen. Da diese Papiere für spezielle Zwecke gefertigt werden, haben sie immer spezifische Eigenschaften, die im Schadensfall eine spezifische Behandlung erfordern. Die spezifische Eigenschaft kann sich positiv auf die Alterung auswirken (z. B. haben Wertpapiere einen sehr hohen Falzwideerstand), aber auch negativ (z. B. verblasst die Schrift bei Thermopapieren unausweichlich).

Wie schon an anderer Stelle erwähnt, werden Papiersorten u.a. nach ihrer Faserstoffquelle in holzhaltig und holzfrei und nach ihrem Veredelungsgrad in gestrichen und natur (= ungestrichen) eingeteilt. Diese Einteilung ist durchaus wichtig für die zu erwartenden Schadensbilder. Des Weiteren werden Papiere noch nach ihrem Ausrüstungsgrad in Format- oder Rollenpapier

eingeteilt. Diese Einteilung spielt für die Weiterverarbeitung von Papier nach der Herstellung in der Papierfabrik eine Rolle, nicht aber im vorliegenden Projekt.

3.2.1.1 Holzhaltige Papiere

Holzhaltige, d. h. ligninhaltige Papiere sind einem Vergilbungsprozess unterworfen. Dies liegt an der Licht- und Temperaturempfindlichkeit von Lignin, welches schon nach kurzer Exposition (einige Tage) unter normalem Tageslicht mit UV-Anteil oder bei höheren Temperaturen ($> 60\text{ °C}$) eine merkliche Farbveränderung zeigt (Chende Luo 1993). Ohne Exposition, d. h. bei Lagerung im Dunklen bzw. lichtdicht eingepackt und bei Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur, findet diese Art der Vergilbung deutlich reduziert bzw. langsamer statt. Der am häufigsten anzutreffende Vertreter dieser Papiersorte unter den Dokumentenpapieren dürfte das Recycling-Büropapier sein. Dieses enthält durch seinen Anteil an Altpapier zwangsläufig auch holzhaltige Fasern und ist damit dem genannten Vergilbungsprozess unterworfen. Es gibt allerdings noch weitere Vergilbungsprozesse. Auch holzfreie Papiere vergilben bei UV-Bestrahlung, allerdings absorbieren Cellulose und Hemicellulose deutliche kürzere Wellenlängen als Lignin, das Tageslicht spielt in diesem Bereich eine untergeordnete Rolle. Zudem ist der chemische Prozess der Farbveränderung ein anderer und wird bei Cellulose eher durch Abbauprodukte hervorgerufen als durch Veränderungen innerhalb des Moleküls wie bei Lignin. Auch Luftschadstoffe und Oxidationsprozesse durch den Luftsauerstoff lösen chemische Reaktionen zu Vergilbung aus, wie im Kapitel 2 bereits ausgeführt. Nicht zu vernachlässigen ist auch Vergilbung, die aus dem Zerfall von optischem Aufheller resultiert. Durch die Veränderung dieses Additivs über die Zeit geht dessen Fähigkeit, UV-Licht in sichtbares Licht im Blaubereich umzuwandeln, verloren. Vom optischen Empfinden würde man diesen Effekt bei Recyclingpapieren oft als Vergrauung oder Verblässen bezeichnen, messtechnisch geht Blauanteil verloren, wodurch sich der gemessene Farbort auf der Blau-Gelb-Achse in Richtung Gelb verschiebt. Bei holzfrei weißen Papieren empfindet man solche Papiere tatsächlich als gelber. Fazit dieser kurzen Zusammenstellung ist, dass eine optische Veränderung bei Papierdokumenten nie ausgeschlossen werden kann. Jedoch bedeutet dies nicht zwingend einen Handlungsbedarf, um die Nutzbarkeit des Dokuments zu erhalten. Dieser ergibt sich erst dann, wenn die Lesbarkeit eines Dokumentes nicht mehr gegeben ist, die Unterscheidbarkeit von Farben im Dokument nicht mehr gewährleistet ist oder die Stärke einer Linie, etwa in einer technischen Zeichnung, nicht mehr korrekt abgeschätzt werden kann. Der Grund dafür muss nicht im Papier liegen, er kann auch in der Farbe/Tinte zu finden sein, wenn diese nicht lichtecht ist.

Ein Schadensfall, der einen Handlungsbedarf erzeugt, kann in Anlehnung an DIN ISO 11798 „Alterungsbeständigkeit von Schriften“ postuliert werden, wenn die in der Norm genannte optische Dichte nicht mehr erreicht wird oder die Farbänderung bei mehrfarbigen Zeichen größer

als dort erlaubt ist (siehe die entsprechenden Tabellen in (DIN ISO 11798)). Die optische Dichte, die von der DIN ISO 11798 angeführt wird, ist ein Maß für den Kontrast zwischen Schriftzeichen und Papierfärbung und wird als „ISO visuel density“ (ISO 5-3) gemessen. Man vergleicht die Lichtreflexion an Stellen mit und ohne Farbe auf dem Bedruckstoff (Green 2008). Zunächst wird der Remissionswert auf dem Bedruckstoff an Stellen ohne Farbe bestimmt und als Referenzwert 0 zugrunde gelegt. Dann wird der Remissionswert an Stellen mit Farbe bestimmt. Da an Stellen mit Farbe weniger Licht zurückgestrahlt wird als an Stellen ohne Farbe, wird ein Wert < 0 gemessen. Der negative dekadische Logarithmus dieses Wertes wird als Farbdichte oder in der DIN ISO 11798 als „optische Dichte“ bezeichnet und sollte so hoch wie möglich sein. Der niedrigste von der Norm akzeptierte Farbdichte-Wert ist 0,3.

Die DIN 32975 „Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung“ schreibt einen Mindestkontrast von 0,4 vor. Allerdings werden andere Lichtarten bei der Messung verwendet und der Wert wird als Verhältnis zwischen Differenz und Addition der Werte Grundstoff mit und ohne Druckfarbe angegeben (DIN 32975). In der Literatur ist dieser Wert als „Kontrast nach Michelson“ erwähnt (Böhringer 2012). Die Qualität der Aussagen aus DIN 32975 und DIN ISO 11798 ist gleich, die Zahlenwerte sind allerdings nicht ineinander umrechenbar.

Die DIN 1450 hingegen legt für die „zweifelsfreie Leserlichkeit von Texten“ sogar einen Kontrast von $\geq 0,7$ zugrunde (DIN 1450). Die Messung und Berechnung erfolgen analog zur DIN 32975.

Die Möglichkeiten zum Umgang mit derartigen Schäden sind folgende:

1. Bleiche
2. Nachzeichnen
3. Duplizieren
4. Wiederherstellung verlorener Information durch Bildanalyse und Interpolation, danach Reproduktion

Die Verfahren dazu sind im Kapitel 3.3 beschrieben.

3.2.1.2 Sauer hergestellte Papiere

Ligninhaltiges Papier, welches mit sauer reagierenden Hilfsmitteln (meist Aluminiumsulfat) hergestellt worden ist, wird nach den Erfahrungen der Archive und Bibliotheken mit großer Wahrscheinlichkeit einer starken Versprödung unterliegen. Betroffen davon wird insbesondere Recyclingpapier sein, welches vor 1990 produziert wurde. Danach kann davon ausgegangen werden, dass auch die Recyclingpapiere mit Neutralleimung und im alkalischen bis neutralen pH-Bereich hergestellt worden sind. Die Versprödung kann gestoppt werden, wenn eine Einzelblatt- oder Massenentsäuerung angewandt wird. Die Wichtigkeit des Verfahrens zeigt sich auch in der Literatur. Eine Darstellung erfolgt an dieser Stelle, weil das Prinzip bei der Massenentsäuerung, der Blockentsäuerung und der Einzelblattentsäuerung (siehe Unterkapitel 3.3.1) Anwendung findet. Im Jahr 2009 wurde ein Abschlussbericht für ein Projekt der Deutschen Bundestiftung Umwelt (DBU) veröffentlicht (Anders 2009). Der Autor beschäftigt sich vor allem mit der Optimierung von Massenentsäuerungsverfahren für Papier. Bezüglich der Ursachen der Papieralterung lehnt er sich an die Aussagen der bereits aufgeführten Literatur an, verweist jedoch darauf, dass Säuren als Auslöser für die hydrolytische Zersetzung katalytisch wirken, also nicht verbraucht werden. Dies kann durch Neutralisationsverfahren gestoppt und durch Einbringen eines alkalischen Puffers langfristig unterbunden werden. Allerdings gilt dies nicht für den oxidativen Angriff auf die Cellulose. Vor allem Eisen- und Kupferionen, die durch Additive bei der Papierherstellung oder durch Druckfarben und Tinten ins Papier gelangen, aber auch schon in den Pflanzenfasern enthalten sind, spielen dabei eine Rolle, weil sie die Bildung von Peroxiden begünstigen. Das Ausmaß der Schäden in den Bibliotheken und Archiven wurde laut Anders erst in den 80er Jahren deutlich, als repräsentative Untersuchungen an einigen amerikanischen Großbibliotheken durchgeführt wurden. Entsprechende Sachverhalte fanden sich auch in anderen Ländern wieder. So wurde z. B. auch in Deutschland auf die dramatische Lage, trotz guter Lagerungsbedingungen, hingewiesen (Anon 1996). Grund ist die große Menge an eingelagertem saurem Papier.

Die verschiedenen zur Verfügung stehenden Verfahren zur Entsäuerung beurteilt Anders dahingehend, dass

- gasförmige Entsäuerungsverfahren bisher nicht in Frage kommen, da sie entweder nicht ausreichend wirken oder in der Anwendung zu gefährlich sind,
- die Trockenverfahren kein Ausbluten der Druckfarben und Tinten oder Versprödung von Ledereinbänden befürchten lassen, da sie ohne Lösungsmittel auskommen, aber dafür die Papierseiten nur an der Oberfläche behandeln und nicht ins Papiergefüge eindringen,
- mit Ammoniak oder Aminen arbeitende Verfahren keinen Puffer und damit keinen Langzeitschutz für die behandelten Papiere einbringen,
- nur unpolare Lösungsmittel eingesetzt werden sollten (um ein Ausbluten der Schriften zu verhindern), die besten Entsäuerungsmittel (MgCO_3 und CaCO_3) aber in diesen Mitteln unlöslich sind.

Über die chemische Vorstufe eines carbonisierten Alkoholats können die gewünschten Hydroxide bis in den Papierkern gebracht werden, jedoch arbeiten manche Verfahren dafür mit alkoholischen (und damit polaren) Lösungsvermittlern, was Ausbluten verursachen kann und somit nicht zu empfehlen ist. Das von Anders optimierte papersave®-Massenentsäuerungsverfahren kommt nur mit organischen Lösungsmitteln aus. Nachteil ist der hohe Energieverbrauch, die lange Behandlungsdauer und die vorübergehend zu hohen pH-Werte. Durch letzteres kann ein basisch katalysierter Abbau der Cellulose verursacht werden, nämlich wenn der pH-Wert über 10 steigt. Zudem bildet sich beim Entsäuerungsprozess Alkohol, welcher ausdampfen muss, um nicht im Nachhinein Ausbluten zu verursachen. Die Entsäuerungsverfahren haben sich als dermaßen wichtig und sinnvoll erwiesen, dass eine eigene Norm zur Prüfung ihrer Wirksamkeit erschienen ist - DIN 31701 „Prüfung der Wirksamkeit von Mengenverfahren zur Papierentsäuerung anhand eines Testpapiers“ (siehe (Allscher und Haberditzl 2019)).

3.2.1.3 Recycling-Büropapiere

Bei Recycling-Büropapieren genauso wie bei holzhaltigen Papieren, die vor 1990 hergestellt wurden, ist von der Notwendigkeit einer Entsäuerung auszugehen. In (Kriese 2019) wird diese Dokumentenkategorie mit der Priorität 2 versehen. D. h. eine Entsäuerung ist hier eine zu empfehlende Präventivmaßnahme, welche die Lebensdauer des gefährdeten Papiers deutlich verlängert. (Andres und et al. 2004) sprechen hier von mindestens einem Faktor 4, den einen Entsäuerungsmaßnahme den Alterungsprozesse (gemessen in künstlichen Alterungsprozessen wie der DIN 6738) verlangsamt. D. h. ein bisher noch nicht geschädigtes Papier aus dem Jahr 1960 wäre nun 60 Jahre alt und dürfte, wenn der Autor recht hat, nach Behandlung bzw. Entsäuerung eine Lebensdauer von über 240 Jahren erwarten. Ob akuter Handlungsbedarf besteht, könnte stichprobenartig über Festigkeitsmessungen festgestellt werden. Sollten die Mindestwerte für Bruchkraft und Bruchdehnung nach DIN 6738 bzw. der Mindestwert für die Durchreißfestigkeit nach ISO 20494 nicht erreicht werden (siehe Tabelle 1 im Unterkapitel 2.3.5), dann besteht ggf. Handlungsbedarf (unter Berücksichtigung der Möglichkeit, dass die Unterschreitung der Mindestwerte nicht aus der Alterung resultieren, sondern weil schon bei der Auswahl der Papiere nicht auf dieses Kriterium geachtet wurde). Verfahren, wie mit bereits stark versprödetem Papier umgegangen werden kann, sind im Unterkapitel 3.3.1 aufgelistet. Somit kann der Papierversprödung wie folgt begegnet werden:

1. Entsäuerung,
2. Anfasern,
3. Laminierung,
4. Kaschieren.

Weiteres zu diesen Verfahren findet sich in Kapitel 3.3. Kurzgefasst kann konstatiert werden, dass bei holzhaltigen Papieren folgende Schäden beobachtet oder befürchtet werden:

1. Vergilbung: Diese tritt im Laufe der Zeit infolge chemischer Alterung des Lignins sicher auf.
2. Versprödung: Diese tritt bei sauer geleimten und sauer hergestellten Papieren sicher auf. Bei neutral geleimten Papieren, die im neutralen oder alkalischen Bereich hergestellt wurden, geht ein Großteil der gefundenen Literatur davon aus, dass die Abbauprodukte des Lignins bei der Alterung auf Dauer trotzdem zu einer Versprödung führen, nur eben stark verzögern.

3.2.1.4 Gestrichene Papiere

Wichtig im Hinblick auf zu erwartende Schäden ist auch der Veredelungsgrad des Papiers, d. h. ob es gestrichen oder ungestrichen (natur) ist. Gestrichen bedeutet, dass man auf die Oberfläche des Papiers eine Farbe aus Pigmenten, Bindemitteln und Additiven bringt. Es ist kein anderer Vorgang als das Streichen einer Raufasertapete mit Wandfarbe. Technologisch bringt das einen Qualitätsvorteil hinsichtlich Weiße und Helligkeit des Papiers, seiner Glätte (das Papier wird glatter und damit besser bedruckbar) und seinem Glanz. Gestrichene Papiere werden meist auch satiniert (d. h. mit Druck und Hitze beaufschlagt, quasi gebügelt), wodurch sich nochmals die Glätte verbessert und das Papier glänzender wird. Viele „Hochglanzbroschüren“ setzen genau auf diesen Effekt, um Produkte möglichst „glänzend“ darzustellen. Der Einfluss des Papierstrichs auf die Alterung eines Dokuments ist noch nicht hinreichend untersucht und wurde im Kapitel 2.5 als dritter Punkt des noch bestehenden Forschungsbedarfs aufgelistet. 2021 ging ein Forschungsprojekt, welches sich mit Teilaspekten der Strichalterung beschäftigte, zu Ende. Dort wurde nachgewiesen, dass sich die Benetzungseigenschaften gestrichener Papiere über ein Jahr natürlicher Alterung ändern. Zudem wurden Abbauprodukte nachgewiesen, die auf eine teilweise Zersetzung der Binder hindeuten können (Genast 2021).

Gestrichene Papiere werden derzeit, genau wie ligninhaltige Papiere, von der ISO 9706 zur Verwendung für Langzeitarchivierung ausgeschlossen. Grund dafür dürften bekannte wie befürchtete Schäden sein, die aus der Streichfarberezeptur herrühren. Jede Rezeptur benötigt ein Bindemittel, weil die Farbpigmente nicht von allein auf der Papieroberfläche haften. Es wäre sonst so, als würde man mit trockener Kreide auf eine Raufasertapete malen – die Pigmente (in diesem Fall Calciumcarbonat) haften nicht dauerhaft. Für den beständigen Strichauftrag werden Bindemittel wie Stärke als natürliches Bindemittel oder Styrolbutadien bzw. Polyacrylate als synthetische Bindemittel zugegeben. Die synthetischen Bindemittel altern wie Kunststoffe, die Bindekraft lässt dadurch nach. Da die Druckfarbe oder Tinte logischerweise vor allem an der Oberfläche zu sehen sein soll, ruht sie bei einem gestrichenen Papier auf dem Strich und damit auch auf den Bindemitteln, die 10 bis 15 % einer Streichfarbenmasse ausmachen. Löst sich der Strich, so löst sich die Druckfarbe ebenfalls, die Information ginge verloren.

Des Weiteren ist nicht bekannt, wie sich Additive, die etwa das Fließverhalten einer Streichfarbe beeinflussen sollen oder den Einsatz von optischen Aufhellern in der Streichfarbe ermöglichen, im Alterungsprozesse verhalten (Beispiele wären Carboxymethylcellulose, CMC, oder Polyvinylalkohol, PVOH). Zersetzungsreaktionen sind möglich mit Abbauprodukten, die einen oxidativen Abbau der Cellulose hervorrufen könnten. Es sind aber auch Migrationsprozesse möglich, d. h. die Additive bleiben nicht gleichmäßig verteilt in der Strichschicht, sondern wandern an eine Grenzfläche, z. B. die Oberfläche oder die Trennfläche Papier/Strich. Dort könnten sie unerwünschte Erscheinungen wie Lösen des Strichs vom Papier oder Verblocken/Verkleben von Seiten hervorrufen. Letzteres ist insbesondere im Zusammenhang mit zu hoher Luftfeuchte während der Lagerung denkbar. In dem Fall spielt zudem eine Rolle, dass der natürliche Binder Stärke, der oft den synthetischen Bindern beigemischt ist, ein gutes Nahrungsangebot für Schimmel darstellt.

Zusammengefasst müssen folgende Schäden bei gestrichenen Papieren befürchtet werden:

1. Verblocken/Verkleben: Durch Aufweichen des Bindemittels in Verbindung mit zu feuchter Lagerung kleben Seiten zusammen, Migration von Streichfarbenadditiven kann dies begünstigen.
2. Verlust der Bindewirkung mit ganzer oder partieller Strichablösung: Dadurch kann sich auch das Schriftbild ablösen.
3. Beschleunigung des Alterungsprozesses durch Abbauprodukte aus der Strichalterung: Die Folge könnte eine beschleunigte Versprödung des Papieruntergrunds sein.

Ergänzend ist zu erwähnen, dass es neben diesen üblichen Strichen zur Verbesserung der Bedruckbarkeit und der Helligkeit des Papiers auch sogenannte „Funktionalstriche“ gibt. Beispiele hierfür sind die thermosensitive Schicht bei Thermodruckpapieren oder die drucksensitive Schicht bei Selbstdurchschreibepapieren. Auch spezielle Inkjet-Beschichtungen zum Ausdruck hochwertiger Farbdrucke gehören hierzu. Neben den Alterungsproblemen, die sich aus der Funktion des Strichs ergeben, bestehen auch die genannten Gefahren durch Bindemittel und Additive.

Der Umgang mit diesen Schäden ist problematisch. Bisher haben sich Verlust der Bindewirkung und beschleunigte Alterung allerdings noch nicht als tatsächliches, massives Problem erwiesen. Falls dies beobachtet werden sollte, wären die auch bei Versprödung anwendbaren Verfahren wie Anfasern, Laminieren und Kaschieren (siehe Kapitel 3.3) nutzbar. Bei nachlassender Bindekraft der Bindemittel ist auch ein Besprühen mit Verfestigern oder deren Einbringen in die Strichschicht über Schwämmchen oder Pinsel denkbar. Bei Verkleben und Verblockung muss eine Trennung der Lagen unter Erhalt des Schriftbildes erfolgen. Dies kann günstigenfalls durch Hitzebehandlung, Anfeuchten, Arbeiten mit Lösungsmitteln oder Enzymen erreicht werden.

Die Maßnahmen

1. Lagentrennung,
2. Anfasern,
3. Laminieren,
4. Kaschieren,
5. Besprühen,
6. Enzymbehandlung,
7. Verfestigen.

sind wiederum in Kapitel 3.3 nachzulesen.

3.2.1.5 Alle Papiersorten

Feuchte, im schlimmsten Fall durch Wassereintrich, ist ein Schaden, der alle Papiersorten gleichermaßen betrifft. Vermeidbar ist er durch sachgemäße Lagerung und Transport. Der Umgang mit Feuchteschäden ist jedoch gängig und etabliert. Feuchteschäden ziehen Verwellungen, Verkleben/Verblocken, Ausbluten der Schrift, Schimmel und Flecken nach sich. Sehr häufig hilft einfaches Reinigen und Trocknen. Schimmel kann jedoch die Festigkeit so stark vermindert haben, dass Maßnahmen wie bei der Versprödung nötig werden. Feuchte kann auch Rost zur Folge haben. Dann müssen die rostenden Teile entfernt und die Flecken durch Reinigung beseitigt werden. Zusätzlich zu den bei Versprödung und Verblocken schon genannten Maßnahmen wären somit zu nennen:

1. Trocknen/Gefriertrocknen,
2. Reinigen,
3. Glätten,
4. Entmetallisieren.

Weiteres findet sich im Kapitel 3.3. Spezialpapiere sind vor allem als Thermodrucke, Selbstdurchschreibepapiere, Blaupausen, Hektographien (Ormig-Kopien oder ähnliche), für Sonderdruckverfahren geeignete Papiere vertreten. Da diese Schriftstücke verblassen werden, ist nur das Duplizieren zu empfehlen.

3.2.2 Vermeidung von Beeinträchtigungen farblicher Kennzeichnungen (Paraphen und Verfügungen)

Die Farbe des Schriftbildes in Büro-Dokumenten ist üblicherweise Schwarz und die Dokumente wurden mit Schreibmaschinen, Nadel-, Toner- oder Inkjet-Druckern hergestellt. Das dafür benötigte Pigment ist Ruß, d. h. sehr feine Kohlenstoffpartikel. Ruß ist nicht bleichbar und vergilbt nicht, somit ist es nicht alterungsanfällig. Ein Problem kann sich dann ergeben, wenn die Schwarzpigmente nicht mehr auf dem Papier haften. Diese Thematik hat vor allem mit den Fixiermethoden zu tun und wird durch die (DIN EN 12283) „Bestimmung der Tonerhaftung“ und die (DIN EN 12281) „Anforderungen an Kopierpapier für die Vervielfältigung mit Trockentoner“ geregelt. Sollte es Haftungsprobleme mit Schwarz geben, so zeigen sich diese in einem frühen Zeitraum und führen zu Reklamation beim Tonerhersteller, nicht aber zu langfristigen Problemen in der Ablage.

Die Dauerhaftigkeit von Tinten und Druckfarben ist in der (DIN ISO 11798) geregelt, hinzu kommen die Anforderungen der (DIN ISO 12757-2) bzw. analog (DIN ISO 14145-2) und (ISO 27668-2) bezüglich der Dokumentenechtheit. Näheres findet sich im Unterkapitel 2.1.2 „Tinten und Druckfarben“. Erwähnenswert an dieser Stelle ist auch die Dienstordnung für Notare (DONot 2020), ein von der jeweiligen Landesjustizverwaltung herausgegebenes Regelwerk, welches in seinem § 29 auf die Herstellung von Urkunden eingeht und dort für die verwendeten Tinten die Einhaltung der DIN ISO 12757-2 und die Einhaltung der DIN 16554 „Kugelscheiber – Minen und Maße“ einfordert, wobei letztere DIN mittlerweile zurückgezogen wurde, da die wesentlichen Aspekte in der DIN ISO 12757-2 enthalten sind

Falls kein Schwarz verwendet wird, so müssen die eingesetzten Farben lichtecht sein, d. h. sie erfüllen die Anforderungen der (DIN ISO 12040). Derartige Farben werden unter extremer UV-Bewitterung langzeitgeprüft (ca. 1 Jahr), erst dann wird ihnen die höchste von 8 Kategorien, nämlich die Kategorie 8 „hervorragend“, verliehen.

Sofern die genannten Normen erfüllt werden, wäre somit nicht mit Beeinträchtigungen hinsichtlich farblicher Schriften, handschriftlichen Notizen oder Stempelabdrücken zu rechnen. Dies scheint auch der Fall zu sein, da farbliche Beeinträchtigungen bei Dokumenten in der Literatur kaum erwähnt werden bzw. wenn, dann im Zusammenhang mit der Vergilbung des Papiers oder mit Auswaschungen durch Entsäuerungsverfahren oder Wasserschäden.

Es gibt zwei Ausnahmen:

-
1. Zu Beginn des Farbdrucks im Büro wurden mit Beginn der Vernetzung von Computern in Intra-Netzen Thermofarbdrucker eingesetzt (ab ca. Mitte/Ende der 80er Jahre). Sie waren netzwerkfähig und arbeiteten thermosensitiv, d. h. mit einer hitzeempfindlichen Strichschicht auf Thermopapier (Thermodirektdruck). Wie schon mehrfach bei Thermopapieren erwähnt, muss hier von einem Verblässen ausgegangen werden und die Dokumenten sollten dupliziert werden. Auch moderne Thermodruckverfahren haben bezüglich der Alterungsbeständigkeit keinen guten Aussichten, sei es wegen mangelnder Abriebfestigkeit (Thermotransferdruck) und/oder wegen zur erwartender Versprödung der Farbschicht (Thermosublimationsdruck; für Fotoqualität eingesetzt) (TonerPartner.de 2021). Jedoch sind alle diese Druckverfahren langsam und teuer, ein großflächiger Einsatz im Büro ist zumindest nicht zu erwarten.
 2. Ausbluten, Verlöschen, Farbtonänderung und Farbauswaschungen werden vor allem als Folgeschäden bei der Entsäuerung von Papier beobachtet. Dies ist ein Nachteil der flüssigen Verfahren, ob wasserbasierend oder mit organischen Lösungsmitteln. Gasförmige Entsäuerungsverfahren umgehen dieses Problem, sind aber, wie von (Anders 2009) dargestellt, nicht dauerhaft wirksam. Auch andere Verfahren der Papierrestaurierung wie Anfasern, Nachleimen, Bleichen, Reinigen nutzen Flüssigkeiten und bergen die Gefahr, dass Schreibmittel, die nicht in einer stabilen Form vorliegen oder in eine solche gebracht werden können, verwischt werden (Siller-Grabenstein 1989). Insbesondere Rot sticht als problematische Farbe hervor, laut Siller-Grabenstein verblasst rote Tinte fast völlig bei Durchführung einer wässrigen Entsäuerung. Von (Andres und et al. 2004) wird ebenfalls, auch bei dem von ihm angewandten neueren Verfahren, über Probleme mit roter Farbe berichtet. Jedoch wird kein Verlust an Informationsgehalt beobachtet, nur ein Ausbluten oder leichtes Verblässen.

Bezüglich des Farbdrucks kann nur eine Duplizierung dergestalt empfohlen werden, dass die Duplikate mit einer beständigen Druckfarbe/Papier-Kombination angefertigt werden und die entsprechenden Normen Berücksichtigung finden.

Hinsichtlich der Restaurierungsschäden infolge der Nassverfahren merkt Siller-Grabenstein [1989] an, dass Dokumente, die mit wasserlöslichen Tinten, Farb- oder Kopierstiften beschrieben sind und auf denen sich Stempelabdrücke befinden, besonders gefährdet sind. Dokumentenechte Tinten und Pasten werden deutlich weniger angegriffen, Druckfarben in der Regel gar nicht. Zu den Druckfarben ist anzumerken, dass ein Ausbluten, Abklatschen oder ein Farbabrieb im industriellen Alltag schnell bemerkt wird und zu Reklamationen führt. Derartige Probleme werden daher von den Druckern und Papierlieferanten umgehend behoben und stellen kein strukturelles Problem dar.

Als Folge der beobachteten Restaurierungsschäden durch Ausbluten und Verblässen wurden vor allem die Reinigungs- und Entsäuerungsverfahren weiterentwickelt und verbessert (siehe insbesondere (Anders 2009)). Jedoch schlägt die oben zitierte Siller-Grabenstein [1989] auch Methoden vor, welche die Gefahr einer Schädigung wasserlöslicher Farben zumindest verringern. Zwei prinzipielle Möglichkeiten werden erwähnt:

1. Aufbringen eines Schutzfilms auf die gefährdeten Schriftstellen: Als Mittel kommen Gelatine und Pergamentleim mit gerbenden Zusätzen (Alkohol, Formaldehyd) in Frage. Pergamentleim wird aus Pergament- oder Lederabfällen hergestellt, ein sehr heller Leim, welcher die gleiche Bindekraft besitzt wie andere Leime, dabei jedoch durchsichtig ist (Ottmar 2007). Das Bindemittel bei Gelatine und Pergamentleim ist Glutin, handelsüblicher Glutin-Leim ist nach DIN EN ISO 9665 „Klebstoffe – Tierleime – Verfahren für Probenahme und Prüfung“ genormt. Auch Methylcellulose wird genannt, also Mittel, die auch zum Nachleimen und Verfestigen von Papier genutzt werden. Synthetische Mittel, die Siller-Grabenstein [1989] auch nennt, werden hier nicht zitiert, da sie in der modernen Papierrestaurierung abgelehnt werden, weil sie neue Probleme (z. T. verspröden die Mittel und altern selbst schneller als das behandelte Gut) in die Archivalien tragen.
2. Komplex- und Farblackbildung: Die vorliegenden löslichen Farbstoffe können anionisch oder kationisch sein. Wenn man weiß, um welchen Typ von Farbe es sich handelt, kann man durch die entsprechenden Gegenionen (aufzutragen als Metallsalze oder organische Substanzen) für eine verbesserte Fixierung der Farbe auf dem Papier oder für eine Verringerung der Löslichkeit der Farbe durch Anhebung des Molekulargewichts (mehrere Farbstoffmoleküle werden durch die Gegenionen aneinandergesetzt) sorgen. Das Verfahren macht dann Sinn, wenn das Fixiermittel keine unerwünschten Folgeschäden hervorruft. Die Kenntnis dazu fehlt jedoch häufig. Des Weiteren können anionische und kationische Farbstoffe nicht gleichzeitig fixiert werden, da die Gegenionen naturgemäß gegeneinander arbeiten. Das Verfahren macht also in Einzelfällen Sinn, wenn ein Stempel oder eine kleine handschriftliche Notiz geschützt werden sollen.

3.3 Beschreibung anwendungsorientierter Methode zur Umsetzung der Empfehlungen zum Umgang mit typischen Schäden an Papierdokumenten

Die folgenden möglichen Maßnahmen zum Umgang mit Papierschäden entstammen wiederum dem Glossar des KEK (Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts 2021), den Webseiten verschiedener Restauratoren sowie den Anbietern von Arbeitsmitteln für Restauratoren und einschlägigen Normen, ergänzt durch eigene Erläuterungen. Gemäß der Leistungsbeschreibung wurden die Informationen in einer Access-Datenbank zusammen-

gefasst. Ausgehend von der Gruppierung (siehe Tabelle 2 Clusterung der vom BASE genannten Schäden) können dort die einzelnen Schadenscluster angewählt werden. Diese führen in der Untergliederung weiter zu den Einzelschäden, wie sie im Kapitel 3.1 und später in 3.4 aufgelistet werden. Zu jedem Einzelschaden können entsprechende Gegenmaßnahmen nebst Schätzung der dafür anfallenden Kosten abgefragt werden. Zu beachten ist, dass in der Access-Tabelle Begriffe nur einmal eingetragen wurden, wenn sie in der Literatur synonym verwendet werden (z. B. Massenentsäuerung und Blockentsäuerung). Im Text des vorliegenden Berichtes sind die Begriffe jedoch mit jeweiligen Querverweisen zueinander aufgeführt. Die Basis für die in der Access-Datenbank aufgeführten Kostenschätzungen ist am Ende des Unterkapitels 3.3.3 erläutert.

3.3.1 Kurzbeschreibung der Wirkprinzipien und technischen Ausführungen

Allgemein kommen bei der Beseitigung von Schäden Verfahren wie Reinigen, vorsichtiges Trennen, Entfernen von unerwünschten Bestandteilen etc. zum Einsatz. Die Verfahren sind äußerst vielfältig, häufig miteinander kombinierbar und werden ständig durch neue Verfahren ergänzt. Dies speist sich daraus, dass Papierrestauration ein eigener Berufszweig ist, der beispielsweise an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste in Stuttgart mit Abschluss „Master of Arts“ studiert werden kann. Die folgende Auflistung gibt somit einen guten Einblick in die Möglichkeiten der Schadensbehebung an Papier, darf aber nicht den Anspruch erheben, vollständig zu sein.

Anfasern: (Wikipedia 2020a) Die Papieranfaserung ist eine Technik der Papierrestauration zur Ergänzung von Fehlstellen (Löcher, Risse) im Papier. Mittels einer wässrigen Faseraufschwemmung wird die Faserflüssigkeit über ein sehr feines Sieb geschwemmt, wobei sich die Fasern an den Fehlstellen und am Rand des Papiers anlagern. Sie verfilzen miteinander und verleihen dem Papier neue Stabilität und Festigkeit, wodurch es wieder benutzbar wird.

Begasung: Dadurch sollen **Schädlinge** oder **Lästlinge** abgetötet werden. Üblich ist die **Stickstoffbehandlung**. Die Begasung mit Ethylenoxid (C_2H_4O , kurz ETO) wirkt sich zerstörend auf Mikroorganismen wie Bakterien und Pilzen, aber auch auf Viren aus. Für den Menschen ist ETO schädlich und wirkt stark karzinogen.

Besprühen: Ein Verfahren, mit dem Papier von der Oberfläche her behandelt werden kann. Statt mit Pinseln flächig kann so feinerstäubt eine Flüssigkeit aufgebracht werden, sei es zur Fleckenentfernung, zur **Verfestigung** oder zum **Nachleimen**.

Bleichen: Je nach Schadensbild kann vergilbtes Papier über eine Bleiche mit Chemikalien oder mit Licht wieder aufgehellt werden. Ein simples Verfahren arbeitet mit Wasserstoffperoxid und Salmiakgeist (Petra Schulz 2021). Die Flüssigkeiten werden mit einem Pinsel auf die aufzuhellenden Stellen aufgetragen. Nach dem Trocknen ist das Papier an diesen Stellen wieder

hell. Unproblematische Schrift, etwa schwarze Druckfarbe mit Rußpigment, kann so mitbehandelt werden, wenn sichergestellt ist, dass die Prozedur die Schrifthaftung nicht aufhebt. Daneben gibt es Lichtbleichanlagen, wie sie etwa der Förderverein Papierrestaurierung Stuttgart dem dortigen Studiengang „Papierrestaurierung“ finanziert hat (Förderverein Papierrestaurierung 2020). Damit lassen sich neue Anwendungen zum Umgang mit vergilbten Papieren erforschen. (Siller-Grabenstein 1989) schlägt noch weitere Bleichchemikalien vor, die aber, wie z. B. Chlor, nach heutigem Kenntnisstand nicht mehr verwendet werden sollten, da sie das zu schützende Gut oxidativ angreifen und so den Alterungsprozess befördern.

Blockentsäuerung: Standardisiertes Verfahren der **Massenentsäuerung**, bei dem fest formierte Objekte wie fadengebundene Akten oder gebundene Bücher mit holzschliffhaltigem Papier in einer nichtwässrigen Lösung entsäuert werden. Dabei wird gleichzeitig eine alkalische Reserve eingebracht, die den **Säurefraß** verlangsamt, jedoch nicht stoppt (siehe **Säurefraß**).

Dekontamination: Maßnahme zur Behandlung von gefährlichen Verunreinigungen wie **Schimmelpilzbefall**. Durch die Entfernung der Verunreinigungen werden sowohl das Kulturgut als auch die Mitarbeiterinnen und Nutzer geschützt. Nach der Behandlung muss eine fachgerechte Lagerung des gereinigten Schriftguts gewährleistet sein, um eine erneute Kontamination zu vermeiden.

Delaminierung: Entfernen einer Folie, die ursprünglich zum Schutz auf das Papier oder ein anderes Trägermaterial aufgebracht wurde. Diese Laminierung schädigt das Objekt im Lauf der Zeit, daher werden sie heute als **Restaurierungsschäden** bearbeitet.

Digitalisierung: Die Überführung materieller Schriftstücke in eine digitale Form. Die Digitalisierung trägt zur Bestandserhaltung bei, indem die Originale seltener genutzt und **Nutzungsschäden** vermieden werden. Im Gegenzug sind im Vorfeld oft Restaurierungsmaßnahmen nötig, da der Scanvorgang sehr empfindliche oder sehr eng gebundene Originale schädigen kann. Mitunter verhindert der Zustand des Originals den Scan völlig.

Duplizieren: Herstellen eines Duplikats, sei es digital, als **Verfilmung** oder als **Ersatzkopie**.

Einbandrestaurierung: Typische Formen der Einbandrestaurierung sind die Ergänzung von fehlenden Materialien oder ganzer Einbandteile wie Deckel oder Rücken. Auch die Befestigung von losem Einbandmaterial zählt dazu.

Einzelblattentsäuerung: Behandlung einzelner Blätter aus **Holzschliffpapier** in einem wässrigen Entsäuerungsbad. Gleichzeitig wird eine alkalische Reserve eingebracht, die den **Säurefraß** verlangsamt, jedoch nicht stoppt (siehe **Säurefraß**).

Einzelblattentsäuerung (Mengenverfahren): Standardisiertes und mechanisiertes Verfahren der Massenkonservierung. Holzschliffhaltige Einzelblätter werden in einem wässrigen Entsäuerungsbad behandelt. Gleichzeitig wird eine alkalische Reserve eingebracht, die den **Säurefraß** verlangsamt.

Entgräten: Ein vom Restaurierungsausschuss des Landesarchivs Baden-Württemberg in einem Bericht erwähnter Begriff (Restaurierungsausschuss 2002), mit dem die Herausnahme von Akten aus Ordner und Heftern sowie deren **Entmetallisierung** und Befreiung von weiteren Büroartikeln (Kleber, Lochverstärker etc.) gemeint ist.

Entmetallisierung: Das Entfernen von metallischen – und damit prinzipiell rostgefährdeten – Teilen aus Akten, also etwa Büroklammern und Heftklammern.

Entsäuerung: siehe **Einzelblatt-** und **Massenentsäuerung**.

Enzymbehandlung: Mittels **Besprühen** oder mit Schwämmchen oder Pinseln können enzymhaltige Lösungen auf das Papier gebracht werden. Die Enzyme greifen selektive bestimmte Substanzen im Papier an. Dadurch kann z. B. ein **Verkleben** oder **Verblocken** aufgelöst werden (Förderverein Papierrestaurierung 2020).

Ersatzkopie: Verfahren, welches insbesondere bei **verblässenden** Schriften eingesetzt wird, etwa den Ormig-Kopien oder bei Thermodrucken. Das Original wird, solange die Schrift noch lesbar ist, per Kopierer auf ein anderes Papier mit einem anderen Bedruckstoff übertragen.

Fachgerechte Lagerung: Diese ist an feste Bedingungen geknüpft: So sind etwa Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Lichteinstrahlung nach den Vorgaben der DIN ISO 11799:2017-04 zu regulieren und regelmäßig zu kontrollieren. Auch Insektenbefall und **Verschmutzungen** müssen über Maßnahmen im Bereich Gebäudemanagement ausgeschlossen werden. Des Weiteren dürfen z. B. keine Wasserleitungen in den Mauern der Archivräume verlaufen, um Wasserschäden zu vermeiden.

Fachkompetenz: Nur durch fachgerechten Umgang kann schriftliches Kulturgut optimal bewahrt, genutzt und konserviert werden. Die stetige Weiterentwicklung der Fachkompetenz durch Schulung oder den Transfer anwendungsbezogener Forschungsergebnisse ist daher eine Notwendigkeit des Originalerhalts.

Falle: Klebe- oder Fressfallen dienen zum Monitoring eines Schädlingsbefalls (siehe auch **Integrated Pest Management**).

Gefriertrocknung: Eine mögliche Erste-Hilfe-Maßnahme bei akuten **Wasserschäden**. Feuchtes bzw. nasses Schriftgut kann durch die Gefriertrocknung bei Unterdruck z. B. vor **Schimmelpilzbefall** und daraus resultierenden zusätzlichen Schäden geschützt werden.

Glätten: **Knicke, Falten, Verwellungen, Blasigkeit** etc. stellen plastische Verformungen von Papier dar und können bei Bedarf ganz oder zumindest teilweise rückgängig gemacht werden. Dies kann händisch durch Glattstreichen oder unter Aufbringen von Druck, Temperatur und Feuchte (quasi durch Bügeln) erreicht werden.

Hygieneset: Ein Spezialsauger inklusive Zubehör, der in Magazinräumen von Archiven und Bibliotheken zur Sauberkeit eingesetzt wird. Böden, Regale und **Schutzverpackungen** müssen regelmäßig mit diesem Sicherheitssauger mit HEPA-Filter gereinigt werden, um möglichen Schäden vorzubeugen. HEPA steht für „High Efficiency Particulate Air“ und bezeichnet spezielle Filter, die kleinste Partikel aus der Luft entfernen. Dazu gehören auch Feinstaub, Pollen und Sporen. Sie werden in modernen Staubsaugern oder Luftwäschern verbaut und verbessern die Luftqualität in Räumen. Kosten des Filters ca. 20 – 30,- €, Kosten des Gerätes ca. 1.500,- € (Daten gemäß LVR-AFZ).

Indikatorstift: Dies ist ein Art Filzstift, der eine Verfärbungsreaktion zeigt, wenn das Papier einen sauren pH-Wert aufweist. Damit kann Papier für die **Entsäuerung** vorausgewählt werden.

Integrated Pest Management (IPM): Dies beschreibt als "integrierte Schädlingsbekämpfung" einen umfassenden Ansatz zur Vermeidung von Schädlingsbefall in Archiven, Bibliotheken und Museen. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Prävention. Über Maßnahmen wie **Reinigung** oder kontinuierliches Monitoring wird gezielt einem Befall vorgebeugt. Bei Befall sind **Quarantäne** und **Dekontamination** Bestandteile des IPM (siehe auch **Falle, Kieselgur** und **Begasung**).

Japanpapier: Aus Bastfasern in Japan hergestelltes, handgeschöpftes Papier. Japanpapier findet besonders in der Papierrestaurierung Verwendung, z. B. zur Schließung von **Rissen** oder Fehlstellen durch **Anfasern**. Dies Art von Papier ist sehr dünn und leicht bei hoher spezifischer Festigkeit, weswegen es sich für diesen Zweck bewährt hat.

Kaschieren: Einbetten einer stark beschädigten Papierseite zwischen zwei Blättern **Japanpapier**. Die beschädigte Seite ist so stabilisiert, jedoch abgeschirmt. Sollte dies nicht akzeptabel sein, kann mit dem Verfahren des **Papierspaltens** eine stabilisierende Schicht ins Innere des Dokuments eingebracht und die äußeren Blätter wieder entfernt werden.

Kieselgur: Dies ist ein ungiftiges, scharfkantiges Pulver, welches sich gegen Insekten einsetzen lässt. Kommen die Tiere mit dem Pulver in Kontakt, bleibt es an ihnen haften und scheuert mit der Zeit den Schutzpanzer durch. Die Tiere trocknen aus und verenden.

Klimaregulierung: Organische Materialien wie **Papier**, **Pergament** oder **Leder** reagieren empfindlich auf Schwankungen des Raumklimas. Ein möglichst schwankungsarmes Klima herzustellen, ist daher eine wichtige Grundlage der **fachgerechten Lagerung** von Schriftgut.

Konservierung: Maßnahmen zur materiellen Sicherung eines Objektes. Der Zustand des Objekts soll erhalten und für die Zukunft bewahrt, natürliche Abbauprozesse sollen verlangsamt werden. Im Gegensatz zur Restaurierung handelt es sich nicht um aktive Eingriffe in die Originalsubstanz.

Konzept: Ein klar umrissener Plan oder ein Programm für ein Vorhaben im Bereich Originalerhalt. Hierzu zählen z. B. Maßnahmenplanungen auf Basis einer **Schadensanalyse** oder Restaurierungskonzepte für Einzelobjekte bzw. Objektgruppen.

Laminieren: Eine stark beschädigte Papierseite wird zwischen zwei Trägermaterialien eingebettet und so stabilisiert. Folien haben sich dabei nicht bewährt, sie können zu Folgeschäden führen, die ein **Delaminieren** erforderlich machen. Besser geeignet ist **Japanpapier**, wobei man hier von **Kaschieren** spricht.

Magazinreinigung: Mechanische Reinigung der Lagerungsräume und Regale/Aufbewahrungssysteme für schriftliches Kulturgut. Die regelmäßige und fachgerechte Reinigung mit neutralen Reinigungsmitteln und unter möglichst wenig Feuchtigkeitseintrag verhindert die **Verschmutzung** der Objekte und beugt Schimmelpilzbefall vor. Hierbei kommt auch das **Hygieneset** zum Einsatz.

Massenentsäuerung: Konservierungsverfahren zur Erhaltung zerfallsbedrohter, industriell gefertigter, säure- und holzschliffhaltiger Papiere. Massenentsäuerungsverfahren haben die Neutralisation der schädigenden Säure im Papier und das Einbringen einer alkalischen Pufferreserve zum Ziel. Der **Säurefraß** wird hierdurch verlangsamt, jedoch nicht gestoppt.

Multispektralanalyse: Aufgrund der unterschiedlichen Reflexionsspektren können mithilfe dieser Untersuchungsmethode Farben, Tinten und Pigmente bestimmt werden und so optimale Restaurierungs- und Konservierungsmethoden bestimmt werden.

Nachleimen: Durch die Entsäuerungsverfahren kann das Papier seine ursprüngliche Leimung verlieren und wird so leichter aufnahmefähig für Wasser bzw. Feuchte. Dem begegnet man durch **Besprühen** oder anderen Methoden, bei denen Materialien wie Gelatine (tierischer Leim), Methylcellulose (MC) oder Carboxymethylcellulose (CMC) in das Papier gebracht werden, wodurch es wieder hydrophobisiert wird (Restaurierungsausschuss 2002).

Nachzeichnen: Es besteht die Möglichkeit, unvollständige Schriftbilder von Hand mit geeigneten Tinten wieder zu vervollständigen. Im Rahmen der Restaurierung wird dies mittlerweile

nach Möglichkeit unterlassen, weil durch diese Maßnahme zukünftige Schäden impliziert werden können. Besser wird eine stabilisierende Konservierung durchgeführt und zum Erhalt der Information ein **Duplikat** angefertigt.

Nassreinigung: Verschiedene Formen der Nassbehandlung von Papieren. Ein Wässern oder Baden hat das Ziel, den Alterungsprozess von holzhaltigem und sauergeleimtem Schriftgut aufzuhalten, gewellte Papiere zu glätten oder Schimmel bei hadernhaltigen Papieren zu bearbeiten. Bei Büchern werden zu diesem Zweck die Bindungen gelöst und nur die einzelnen Bogen gewässert.

Notfallbox: Behälter mit Utensilien zur akuten Evakuierung, Sicherung und Dokumentation gefährdeten oder geschädigten Schriftguts. Eine voll ausgestattete Notfallbox enthält sämtliches **Notfallmaterial**, um nach einem Wasserrohrbruch oder anderen Ernstfällen schnell Hilfe an den Objekten leisten zu können.

Notfallmaterial: Sämtliche Ausstattung, die bei akuten Notfällen wie Hochwasser, Rohrbruch oder Brand eingesetzt werden kann. Die Materialien reichen von handlichen **Notfallboxen** bis hin zu Bergungsgeräten eines **Notfallzugs** für den Großeinsatz.

Notfallplan: Ablaufplan für die Reaktion auf akute Notfälle. Der Notfallplan enthält etwa wichtige Kontaktdaten, Alarmketten, Gebäudegrundrisse und Angaben zu Ausweichquartieren zur Auslagerung von gefährdetem Schriftgut.

Notfallverbund: Zusammenschluss von Institutionen zur Optimierung der Reaktion auf akute **Notfälle**. Die gegenseitigen Verpflichtungen werden schriftlich in Form von Notfallvereinbarungen festgehalten und in die **Notfallpläne** der Institutionen aufgenommen.

Notfallvorsorge: Projekte zur Notfallvorsorge umfassen die Beschaffung von **Notfallmaterial**, die Durchführung von Schulungen sowie Netzwerktreffen eines schon bestehenden oder neu zu gründenden **Notfallverbunds** und weitere Aktivitäten. Das Ziel ist die flächendeckende und bestmögliche Absicherung schriftgutverwahrender Einrichtungen gegen Notfälle und Katastrophen.

Notfallzug: **Notfallmaterial**, das in größerem Umfang, etwa bei der örtlichen geschulten Feuerwehr, für Notfälle vorgehalten wird. Diese Ausstattung macht die schnelle, zentral koordinierte Reaktion auf Katastrophen möglich.

Papierspalten: Hochspezialisiertes Restaurierungsverfahren zur Stabilisierung beschädigter Papiere. Die Originalseite wird dabei mit Hilfe zweier von außen angebrachten Kaschierpapiere bzw. Trägerpapiere gespalten und anschließend ein Kernblatt zur Festigung eingefügt. Nach Verklebung der gespaltenen Papierhälften mit dem stabilen Kernpapier werden die nicht mehr benötigten Trägerpapiere wieder abgelöst.

Phytatbehandlung: Wässriges Verfahren zur Behandlung von Tintenfraß. Dabei werden die freien Eisenionen ausgespült, damit sie nicht mehr mit dem Sauerstoff reagieren können. Die Bildung der schädigenden Schwefelsäure, die bei dieser Reaktion ansonsten entsteht, wird verhindert.

Quarantäne: Im Rahmen des **Integrated Pest Managements** ist dies eine Maßnahme, die sich auf mit Schädlingen befallene Dokumente bezieht. Die Dauer muss davon abhängig gemacht werden, wie lange es dauert, bis ein Befall ausgeschlossen werden.

Reparatur: Dies bezeichnet eine Maßnahme, die darauf abzielt, die Funktionalität eines Objektes und/oder sein Erscheinungsbild wiederherzustellen. Von der Restaurierung unterscheidet sich die Reparatur dadurch, dass bei ihr keine Rücksicht auf einen historischen Kontext genommen werden muss, d. h. es müssen keine alten handwerklichen Techniken angewendet oder historische Materialien verwendet werden.

Reproduktion: Schriften und Druckverfahren können Spuren im Papier hinterlassen, auch wenn die Schrift nicht mehr zu sehen ist. Dies kann durch lokale Kompression oder chemische Veränderungen an der Stelle der Fall sein. Mit Hilfe von hochauflösenden Bildaufnahmen ließen sich anhand entsprechender Algorithmen die Spuren der Schriften erkennen oder durch Anfärbungen bzw. chemische oder thermische Behandlung sichtbar machen. Dazu müssten bestehende Bildanalyseverfahren (Mikut 2004) adaptiert und ggf. mit OCR-Verfahren (optical character recognition) kombiniert werden. Fehlende Elemente können u.U. durch Interpolation und Worterkennungs- bzw. Rechtschreibsoftware wiederhergestellt werden. Auch forensische Methoden der Kriminaltechnik könnten hier eventuell weiterhelfen (was plausibel erscheint, wozu aber keine Literatur gefunden wurde). Die gewonnenen Informationen können dann genutzt werden, um die Originalinformation zu reproduzieren und ein **Duplikat** herzustellen.

Restaurierung: Maßnahmen zur Wiederherstellung eines beschädigten Objekts. Diese können sich je nach Art und Ausmaß des festgestellten Schadens auf die Ergänzung von verlorengemangenen Material beschränken oder auch einen tiefen Eingriff in die Struktur eines Objekts bedeuten. Restaurierung zielt auf die Sicherstellung und Wiederherstellung der Gebrauchsfähigkeit einzelner Objekte, wobei, anders als bei der **Reparatur**, der Charakter des Originals durch weitgehende Erhaltung der originalen Substanz bewahrt werden soll. Restaurierungen sollten nach geltenden Standards reversibel sein, um **Restaurierungsschäden** zu verhindern und nachkommenden Generationen die Anwendung neuer Restaurierungsmethoden zu ermöglichen.

Schadenanalyse: Diese dient der Begutachtung und Bewertung bereits vorhandener Schäden. Schäden werden aufgenommen und klassifiziert. Näheres dazu findet sich in Kapitel 3.3.3.

Schädlingsbekämpfung: Die Maßnahmen zur Bekämpfung von Schädlingsbefall in Archiven, Bibliotheken und Museen sind vielfältig. Präventivmaßnahmen wie **Magazinreinigungen** oder **Klimaregulierungen** stellen erste Schritte dar. Ein umfassender Ansatz zur Vermeidung von Schädlingsbefall an Beständen von Kulturgut steht im Zentrum des **Integrated Pest Managements (IPM)**.

Schreibmittelanalyse: Verfahren zur Analyse der Bestandteile von Schreibmitteln wie Tinte, Bleistift oder Farbe. Über Trennverfahren können Stoffgemische aufgelöst und z. B. Ursachen für schädigende Prozesse identifiziert werden.

Schulung: Maßnahmen zur Erweiterung oder Vertiefung der Fachkompetenz in schriftgutbewahrenden Einrichtungen, etwa im Bereich der **fachgerechten Lagerung** oder **Notfallvorsorge**.

Schutzverpackung: Behältnisse, die zur Aufbewahrung von Schriftgut dienen und allseitig geschlossen sind, so dass der Inhalt vor Staub sowie Licht geschützt ist und Klimaschwankungen abgemildert werden können. Die Kassetten müssen aus alterungsbeständigem, säure- und holzschliffreiem Material gemäß ISO 9706 bzw. ISO 16245 Typ A gefertigt sein.

Spalten: siehe **Papierspalten**.

Stickstoffbehandlung: Maßnahme zur Schädlingsbekämpfung in Archiven, Bibliotheken und Museen. Ziel dieser Methode ist es, eine sauerstoffarme Atmosphäre zu schaffen, in der die Schädlinge ersticken. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Schädlinge in sämtlichen Entwicklungsstadien wirksam abgetötet werden können und keine gefährlichen Rückstände oder Schädigungen an den Objekten verbleiben bzw. eintreten.

Trockenreinigung: Mechanische Reinigung verschmutzten Schriftguts unter der Anwendung geeigneter Reinigungsbürsten, Latexschwämme und Sauger. Diese mechanische Maßnahme wird manuell an speziell ausgestatteten Sicherheitswerkbänken, sog. „Reinen Werkbänken“, durchgeführt. Zur allgemeinen regelmäßigen Reinigung kommen Spezialstaubsauger zur Anwendung, siehe dazu das Stichwort **Hygieneset**.

Überfliesen: Mechanisches **Anfasern** geschädigter Papiere mit einem dünnen Faserbrei, etwa aus **Japanpapier**. Darüber kann das Material stabilisiert werden, ohne dass die Lesbarkeit des Originals beeinträchtigt wird (siehe hierzu auch **Laminieren** und **Kaschieren**).

Vakuumtrocknung: Als Bestandteil der Gefriertrocknung ist die Vakuumtrocknung eine mögliche Erstreaktion bei akuten **Wasserschäden**. Feuchtes und nasses Schriftgut kann dadurch z. B. vor **Schimmelpilzbefall** und den daraus resultierenden zusätzlichen Schäden geschützt werden.

Verfestigen: Durch **Besprühen**, Auftrag mit Pinseln oder anderen Verfahren können, ähnlich wie beim **Nachleimen**, Papiere mit Materialien versehen werden, die ihre Festigkeit wieder erhöhen. Auch **Anfasern**, **Laminieren**, **Kaschieren** und **Überfliesen** sind Verfestigungsmaßnahmen.

Verfilmung: Die Kopie des Inhalts eines Originals auf ein Ersatzmedium. Die Mikroverfilmung oder Schutzverfilmung kann ähnlich wie die Digitalisierung eine sinnvolle Ergänzung zur Konservierung darstellen, denn über das Angebot des Ersatzmediums, z. B. im Nutzungsbereich, werden Originale geschont (siehe auch **Duplizieren**).

3.3.2 Grenzen der Methoden

Immer wieder findet sich beim Literaturstudium zur Archivierbarkeit von Papier die Aussage, wie wichtig Papierdokumente im Original sind, da sie nicht nur die auf ihnen gespeicherte Information übermitteln, sondern den historischen Kontext erfahrbar und anfassbar machen. Der unglückliche Umstand, dass mit der sauren Leimung der Zersetzung des Papiers ungewollt Vorschub geleistet wurde, hat auf der anderen Seite dazu geführt, dass Methoden zur Konservierung und Restaurierung weiterentwickelt und verbessert wurden. Dieser Prozess dauert immer noch an. Der Erhalt von Papierdokumenten stößt auf breites, auch öffentliches Interesse, Forschung und Aktivitäten hierzu werden gefördert. Allein die Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts (KEK) hat in den Jahren 2019 und 2020 fast 9 Mio € an Geldern für Erhaltungsprojekte von Schriftdokumenten bereit gestellt (KEK 2021). Hinzu kommt die ständige Forschung, die z. B. durch den Studiengang „Papierrestauration“ an der Kunstakademie in Stuttgart betrieben wird. Methoden zum Umgang mit Schäden werden dadurch ständig weiterentwickelt. Des Weiteren speist sich dieses Themenfeld auch aus der Forensik. Es sei daran erinnert, dass von der Stasi nach dem Mauerfall geschredderte Akten wieder rekonstruiert werden konnten, wozu eigens ein maschinelles Verfahren entwickelt wurde, Behördenbezeichnung „Virtuelle Rekonstruktion vorvernichteter Stasi-Akten“ (BStU 2021).

Ein weiteres Beispiel ist die erfolgreiche Anwendung von Röntgenscannern am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA. Damit konnten ungeöffnete historische Dokumente ohne Veränderung des Originalzustandes gelesen werden (Podbregar 2021).

Die technischen Grenzen der Methoden finden sich da, wo nichts mehr vorhanden ist (Verlust, Diebstahl) oder eine komplette Umwandlung (komplett verbrannt, Schrift komplett verblasst und nicht reproduzierbar) stattgefunden hat. Selbst dann lassen sich jedoch bei entsprechendem Daten- und Dokumentenmanagement Inhalte noch rekonstruieren, aus Querverweisen, Zitaten und ähnlichem.

Dennoch kann man bei der Restaurierung, aber auch der Konservierung, an Grenzen stoßen, sei es zeitlich oder finanziell. Die eben zitierte Rekonstruktion der Stasi-Akten beispielsweise begann im Jahr 1990, ab 2007 wurde das maschinelle Verfahren entwickelt, bis 2018 waren 500 Säcke von insgesamt 16.000 bearbeitet worden. Dieser Aufwand muss durch die Wichtigkeit der erwarteten Information gerechtfertigt und in der Reihenfolge der Abarbeitung priorisiert werden.

Finanziell kann man ebenfalls an die Grenzen stoßen. Die oben erwähnte Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts hat als größte Einzelprojekte bisher jeweils 400.000 € für die Restauration des Buchbestandes Kloster Preetz (Dauer des Projektes: 2 Jahre) und für die Reinigung, Massenentsäuerung und Schutzverpackung von Schriften des Arolser Archivs zur NS-Verfolgung (Dauer des Projektes: 1 Jahr, 70.000 betroffene Dokumente) bereitgestellt (KEK 2021).

Die Grenzen liegen somit vor allem in der zu treffenden Entscheidung, was tatsächlich erhalten und restauriert oder repariert werden muss.

3.3.3 Aufwand zur Umsetzung der Methoden (Zeitbedarf, techn. Ressourcen, Personal, Kosten)

Naturgemäß ist jeder Schadenfall ein Einzelfall und als solcher zu bewerten und zu priorisieren. Nichtsdestotrotz können allgemeingültige Angaben und Annahmen helfen, die Folgen einer zu treffenden Entscheidung bezüglich gebundener Personalkapazitäten und zu veranschlagender Finanzmittel besser abzuschätzen.

Hierzu existiert ein Bericht aus dem Jahre 2002 (zu finden beim Landesarchiv Baden-Württemberg), in dem ein Restaurierungsausschuss Maßnahmen und Aufwand für Restaurierung und Konservierung zusammengetragen hat (Restaurierungsausschuss 2002). Die Grundsätze dieses Berichts treffen die Erfordernisse des Projekts Labest Papier so gut, dass er hier wörtlich zitiert wird (Zitat Beginn):

Die Wechselwirkung von Maßnahmen und Kosten für die Konservierung und Restaurierung von Archivgut lässt sich in folgenden Thesen zusammenfassen:

- 1. Die Höhe des Aufwands für eine Erhaltungsmaßnahme hängt von mehreren voneinander unabhängigen Faktoren ab, in erster Linie sind das neben Schadensart und –umfang die Ziele der Maßnahme. Weiteren Einfluss haben die Kommunikation zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer sowie die Qualität der Durchführung.*
- 2. Ohne Zielvorgaben und Prioritätensetzung ist die Erhaltung von Archivbeständen nicht möglich. Gerade das Mengenproblem zwingt zu archivischen Bewertungsentscheidun-*

gen. Diese Ziele müssen in den Archiven transparent gemacht und den Auftragnehmern, also Dienstleistern oder hauseigenen Restaurierungswerkstätten, vermittelt werden.

3. *Jeder Maßnahme muss eine Schätzung des Aufwands vorausgehen, sowohl bei hausinterner Durchführung als auch bei Vergabe an Dienstleister. Hierbei müssen, wenn irgend möglich, verschiedene Behandlungsmethoden gegeneinander abgewogen werden, wobei dem Auftraggeber durch Erläuterung der jeweiligen primären und sekundären Wirkungen ermöglicht werden muss, eine Entscheidung entsprechend der eigenen archivfachlichen Zielvorgabe zu treffen.*
4. *Angaben zum durchschnittlichen Aufwand für eine bestimmte Maßnahme sind dann möglich, wenn eine nennenswerte Anzahl von Objekten mit einheitlichen Schäden nach einer einheitlichen Vorgehensweise bearbeitet wird - sogenannten Mengenbehandlungen. Einzelrestaurierungen erfordern immer eine individuelle Aufwandsschätzung.*
5. *Um ständig wachsenden Schäden und damit zusätzlichem Erhaltungsaufwand auch an noch intaktem Archivgut vorzubeugen, sind präventive Maßnahmen der Bestandserhaltung vorrangig. Insbesondere die sachgerechte Reinigung, Entmetallisierung und Verpackung von neu eingegangenen Akten vor der Einlagerung ins Magazin muss zum Regelfall werden: Nur so kann - neben der Verfilmung - die größte Langzeitwirkung mit geringstmöglichem Aufwand erreicht werden.*
6. *Das wachsende Angebot an Dienstleistungen für die Bestandserhaltung eröffnet den Archiven für diese Fachaufgabe eine größere Vielfalt von Möglichkeiten. Voraussetzung für eine erfolgreiche Nutzung des Marktes ist die Wahrung bzw. der Aufbau von entsprechender Fachkompetenz in den Archiven und Archivverwaltungen, da diese in der Lage sein müssen, die für eine Auftragsvergabe erforderlichen Entscheidungen zu treffen.*

(Zitat Ende)

Ob und welche Maßnahme in einem Schadenfall getroffen werden soll, kann über 4 Schritte erarbeitet werden (Zitat Beginn):

Schritt 1: Erfassung und Wertung der vorhandenen Schäden

Die Schäden müssen zunächst wertend begutachtet werden. Damit die Zielvorgaben – Erhaltung des Objekts für die Zukunft einerseits, Zugänglichkeit des Objekts für die Benutzung andererseits – Grundlage der Entscheidung werden können, hat der Restaurierungsausschuss die folgenden Schadensklassen zugrunde gelegt:

Schadensklasse 1 (irreparable, extrem komplizierte Schäden): Es bestehen bereits irreversible Informationsverluste. Das Objekt ist ohne weitere Verluste weder benutzbar noch verfilmbar.

Schadensklasse 2 (Objekt unbenutzbar – schwere Schäden): Auch bei vorsichtiger Benutzung besteht die Gefahr von Substanz- und Informationsverlust. Objekt unter möglicher Inkaufnahme von Verlusten verfilmbar.

Schadensklasse 3 (Objekt bei Benutzung gefährdet – erkennbare, mittlere Schäden): Unvorsichtige Handhabung während der Benutzung und bei Transporten kann das Objekt [weiter] schädigen. Es ist ohne besondere Maßnahmen verfilmbar.

Schadensklasse 4 (leichte oder nicht erkennbare Schäden): Das Objekt lässt sich für die Zukunft erhalten, wenn es den Regeln entsprechend konservierend behandelt wird.

Schritt 2: Formulieren der Ziele für die Restaurierungsmaßnahme – Festlegen von Prioritäten

Zielvorgaben können unterschiedlich sein und sich u.U. gegenseitig ausschließen, deshalb ist eine Prioritätensetzung unumgänglich. Vom Auftraggeber ist insbesondere vorzugeben, ob eine Benutzung des Stücks im Original und damit Stabilität gefordert ist, welcher Quellenwert der physischen Erscheinung des Stücks zukommt und welches Gewicht auf die Erhaltung der originalen Substanz gelegt wird (...)

Die wichtigsten zu prüfenden Ziele sind:

- I. Benutzbarkeit des behandelten Objekts im Original
- II. Benutzbarkeit des behandelten Objekts mittels Schutzmedien
- III. dauerhafte Bewahrung des authentischen Erscheinungsbildes
- IV. dauerhafte Bewahrung der originalen Substanz
- V. dauerhafte Sicherung der Information
- VI. Wiederherstellbarkeit des Vorzustands (nur reversible Maßnahmen)
- VII. Präsentabilität
- VIII. Verfügbarkeit des behandelten Objekts zu bestimmtem Termin
- IX. Einhalten einer vorgegebenen Kostenobergrenze.

Schritt 3: Zusammenstellung und Prüfen der geeigneten Methoden, Aufwandsermittlung

Auf dem Hintergrund dieser Zielvorgaben kann sich die Entscheidungsinstanz einen Überblick über die Restaurierungsmethoden verschaffen, die ihr auf dem Dienstleistungsmarkt, in (...) eigenen oder zentralen Werkstätten, bei Kooperationspartnern usw. zur Verfügung stehen. Bei

allen größeren Maßnahmen sind die möglichen Methoden auf die geforderten Ziele hin zu beurteilen. Nur mit den entsprechenden Fachkenntnissen kann der mit einer bestimmten Methode verbundene Aufwand beurteilt werden.

Schritt 4: Entscheidung anhand der Zielvorgaben

Wenn alle erforderlichen Informationen über Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren sowie über den erforderlichen Aufwand für den betreffenden Fall zusammengestellt sind, kann die Fachentscheidung getroffen werden. Diese muss anhand der zuvor gesetzten Prioritäten nachvollziehbar sein.

(Zitat Ende)

Auf dieser Basis schildert der Bericht einige Modellbeispiele, die dazu dienen, die Vorgehensweise zur verdeutlichen und die entstehenden Kosten abzuschätzen. Für das Projekt Labest Papier dürfte die Entscheidungsmatrix für säurehaltige, ligninhaltige Papiere – wie z. B. ein Recycling-Büropapier – von Bedeutung sein und wird darum hier erläutert. Da der Bericht aus dem Jahre 2002 stammt, werden die dort angegebenen Preise mit einer durchschnittlichen Inflation von 1,6 % (geometrisches Mittel über die Jahre 2002 bis 2020, Quelle (Team Finanz-Tools 2021)) hochgerechnet und auf 10 ct-Beträge gerundet. Betrachtet wird im Beispiel nur das Schadensbild „Versprödung“.

Angenommen, die Begutachtung des Schadens (Schritt 1) führt zur Feststellung der Schadensklasse 2 „schwere Schäden, Objekt unbenutzbar“. Wenn (Schritt 2) die Ziele I bis V erreicht werden sollen (Benutzbarkeit des Dokuments im Original unter Erhaltung des authentischen Erscheinungsbildes bei dauerhafter Bewahrung der Substanz und der enthaltenen Information), so kämen (Schritt 3) die Maßnahmen Entsäuerung, Papierspalten mit anschließendem Verfestigen plus Verfilmung (bzw. Duplizieren) in Frage. Der Aufwand wäre sehr hoch, die Kosten bei einem externen Dienstleister werden mit 6,70 €/Blatt angegeben. Verzichtet man auf die Authentizität des Erscheinungsbildes (Ziel III), so käme man auf die Maßnahmen Entsäuern, Kaschieren und Duplizieren. Dadurch reduziert sich der Aufwand auf ca. 2,00 €/Blatt. Verzichtet man komplett auf die dauerhafte Erhaltung des Originals und verfolgt nur noch Ziel V (Erhaltung der Information), so reicht als Maßnahme das Duplizieren, was mit 20 ct/Blatt angegeben wird.

Im Beispiel werden auch Szenarien mit mittel und leicht geschädigten Papieren behandelt, die Kosten reduzieren sich, da die Handhabung der Proben weniger vorsichtig geschehen muss und die Maßnahmen geringer ausfallen können. Ein leicht geschädigtes Papier (Schadensklasse 4, d. h. man stellt eine Tendenz zur Versprödung fest; laut Empfehlung im Unterkapitel 3.2.1 wäre dies dann der Fall, wenn die geforderten Mindestfestigkeitswerte nach DIN 6730 oder ISO 20494 nicht mehr erreicht werden, aber ansonsten keinen Schäden erkennbar sind)

könnte allein mit der Maßnahme Entsäuern behandelt werden, was zu einem Aufwand zwischen 10 ct/Blatt und 30 ct/Blatt führen würde. Ein Duplizieren wäre hierin noch nicht eingeschlossen und würde zusätzliche Kosten von nochmals 10 ct/Blatt verursachen.

Des Weiteren geht der zitierte Bericht auf typische Praktiken zur Erhaltung von Archivalien ein. Für das Projekt Labest Papier ist der Fall „Konservierungsarbeiten an modernem Behördenschriftgut durch nicht restauratorisch geschultes Personal“ sicher in hohem Maße zutreffend (Tabelle 3).

Der ermittelte Zeitaufwand (er entstammt einer Abfrage bei verschiedenen Restaurationsstellen) lässt sich auf einen Modellfall anwenden und zu einer Kostenangabe nutzen. Angenommen wird ein Aktenbestand von 1 lfdm Umfang, bestehend aus 100 Einheiten à 80 Blatt. Entsprechend müssen 8.000 Blatt gereinigt und entmetallisiert werden, was (gerechnet gemäß Tabelle 3 mit 0,4 min/Blatt) zu einem Zeitaufwand von 3.200 min führt. Jeweils 1 % der Blätter müssen ausgebessert und ersatzkopiert werden, was beide Male mit 0,7 min/Blatt mal 80 Blatt zu 2 x 56 min, d. h. insgesamt schon zu 3.312 min führt.

Tabelle 3 Arbeiten an behördlichem Schriftgut vor Einlagerung

Tätigkeit	Beschreibung	Aufwand/Blatt
Trockenreinigen, Entgräten	Entnahme der Dokumente aus bisherigen Behältnissen (meist Stehordner); Entmetallisieren; Reinigen mit Staubsauger, Pinsel oder Gummi	0,3 bis 0,5 min
Ausbessern	Verschließen von Rissen mit Spezialmaterial	0,4 bis 1 min
Ersatzkopie	Bei Thermofaxen, Ormig-Kopien, schlechter Lesbarkeit	0,5 bis 1 min
Beschneiden d. Ränder	Nur bei Beschädigung; Abmessen, dann Schneiden von Hand oder mit Maschine	0,4 bis 0,5 min
Einlegen	In Mappen, dann in Kartons	2 min/Einheit
Signieren	Signieren der Behälter oder Etiketten anbringen	3 min/Einheit

Einlegen in die Einheiten braucht 2 min/Einheit x 100 Einheiten also 200 min, Signieren bzw. Bekleben mit Etiketten benötigt 3 min/Einheit, also 300 min. Schlussendlich werden für einen laufenden Meter Aktenbestand in diesem Beispiel 3.542 min, d. h. fast 60 h Arbeitszeit benötigt. Legt man für das Beispiel die Kosten einer Bürokraft ohne Aufgaben, für die besondere Kenntnisse erforderlich sind, zugrunde (an der TU Darmstadt wäre das die Entgeltgruppe E6 mit Kosten inkl. Arbeitgeberanteil von ca. 30,- €/h), so ergeben sich daraus Personalkosten für die Maßnahme von 60 h x 30,- €/h, d. h. 1.800,- €. Nimmt man noch Material (Kopierkosten, neue Ordner etc.) hinzu, dann kann eine solche Maßnahme mit ca. 2.000,- €/lfdm veranschlagt werden. Im Vergleich dazu kann eine solche Maßnahme laut dem zitierten Bericht bei einem Fach-Anbieter auf dem freien Markt für ca. 600,- €/lfdm bis 1.000,- €/lfdm (inflationsbereinigt) eingekauft werden.

Sollte wegen des holzhaltigen Recyclingpapiers noch ein Entsäuern nötig sein (angenommen sei hier lediglich die Handlungsnotwendigkeit, also Schadensklasse 4), dann kämen bei durchschnittlichen Kosten noch 1.600,- € für die Einzelblattentsäuerung hinzu. Der Gesamtaufwand je laufendem Aktenmeter beliefe sich daher auf 2.200,- € bis 3.600,- €.

Kritisch ist anzumerken, dass der Bericht des Restaurierungsausschusses, auf den zurückgegriffen wird, aus dem Jahr 2002 stammt und noch Maßnahmen beschreibt, die von der heutigen Papierrestaurierung abgelehnt werden (z. B. das Laminieren zwischen Folien, weil die Folien verspröden können und damit den Restaurierungszweck nur kurzzeitig erreichen). Es ist z. B. unklar, auf welchem Verfahren die bezifferte Einzelblattentsäuerung beruht und ob es sich dabei eventuell um eine der von Anders abgelehnten Verfahren handelt ((Anders 2009); siehe Unterkapitel 3.2.1).

Hingewiesen sei noch auf ein Grundlagenpapier zur Durchführung von Massenentsäuerung (Kriese 2019). Dieses enthält Mustervorlagen für Bestandsaufnahmen für Schäden, Erstellung von Leistungsverzeichnissen und Musterverträgen für die Vergabe von Entsäuerungsmaßnahmen.

Für die Angaben zur Kostenschätzung, die in der Access-Datenbank, welche im Rahmen dieses Projektes erstellt wurde, hinterlegt sind, wurden folgende Angaben bzw. Annahmen zugrunde gelegt:

1. Die Kosten werden angegeben in:
 - a. Preis pro Blatt, wenn es sich um Maßnahmen an Einzelblättern handelt,
 - b. Preis je lfdm Akten, sofern es sich um größere Aktenbestände handelt,
 - c. Preis je Probe, falls Analysen am Material erforderlich sind,
 - d. Preis je Maßnahme, Investition oder Material,
 - e. Ohne Preisangabe, wenn eine Schätzung nicht sinnvoll ist.
2. Die Kosten basieren auf folgenden Annahmen bzw. Angeboten:
 - a. 1,- € je Minute Arbeitszeit bei Fachkräften, 50 ct je Minute bei Angelernten, der geschätzte Zeitbedarf für Maßnahmen entstammt dem Bericht (Restaurierungsausschuss 2002), der auch Tabelle 3 Arbeiten an behördlichem Schriftgut vor Einlagerung zugrunde liegt,
 - b. 1 lfdm Akten entspricht ca. 8.000 Blatt,
 - c. 1 m³ Rauminhalt fast ca. 12 lfdm Akten,
 - d. Kosten Stickstoff: ca. 1,- €/m³ (Preisniveau 2021 im eigenen chemischen Labor),
 - e. Kosten Schädlingsmonitoring: ca. 300,- €/Monat (Firma „wespina“, Preis 2021),
 - f. Kosten für Material, wie Indikatorstift, Kieselgur, Notfallbox etc. wurden durch Internetsuche als preislicher Querschnitt der gefundenen Anbieter angegeben.

3.4 Weitere Schäden

Vor dem Hintergrund des Schutzes des kulturellen Erbes schreibt die DIN EN 16790 (zitiert nach (Allscher und Haberditzl 2019)) eine integrierte Schädlingsbekämpfung (IPM = integrated pest management) vor, die gegen Insekten, Mikroorganismen (einschließlich Pilzen) und Nagetiere gerichtet ist. Diese soll weitestgehend durch ein Managementsystem erfolgen und nur in Ausnahmen auf Biozide zurückgreifen.

Entsprechend stehen Risikobewertung, Zuweisung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten, Vorbeugemaßnahmen und Überwachung an vorderer Stelle, dann erst folgen Maßnahmen zur Abhilfe. Zudem werden Bestrahlung und Begasung von einigen Experten als kritisch gesehen, da hierdurch Mechanismen in Gang gesetzt werden könnten, die zu chemischen Veränderungen mit beschleunigter Wirkung auf die chemische Alterung führen könnten (dies ist aus Gesprächen mit Archivaren und Diskussionen im Normungsausschuss NA 009-00-14 AA " Bestandserhaltung in Archiven und Bibliotheken" bekannt).

Insbesondere für den Fall, dass Materialien umgelagert werden, sind Vorabprüfung auf Befall und ggf. Quarantänezeiten einzuplanen. Im Falle eines festgestellten Befalls in Beständen sind Isolation und Reinigung die wichtigsten Maßnahmen. Nagetiere sollen primär durch Fallen und nicht durch Gift entfernt werden, da ein Tod der Tiere an unzugänglichen Orten durch deren Verwesung erhebliche Probleme verursachen kann. Ähnlich wie bei Insekten wird für diesen Befall die Einschaltung zertifizierter Firmen zur Schädlingsbekämpfung vorgeschlagen.

Bei Pilzen, Algen, Moosen und Flechten kommen zunächst Reinigungsverfahren zur Anwendung. Die Ursache des Befalls, die meist in nicht korrekter Belüftung, Klimatisierung und anderen Lagerbedingungen zu suchen ist, muss identifiziert und beseitigt werden.

Auch Vögel, Fledermäuse, Eichhörnchen, Wiesel, Marder, Füchse, Dachse und weitere Tiere können eine Gefahr für Dokumente darstellen, sowohl durch deren direkte Zerstörung als auch durch Kontamination mit Kot, Urin, Nistmaterial oder Nahrungsresten.

Schimmelbefall bzw. dessen Vermeidung ist auch ein Thema bei der Verpackung von Lebensmitteln. Insofern ist zu prüfen, ob Verfahren wie von der ISEGA in Aschaffenburg, einem zertifizierten Prüfinstitut für chemische und physikalische Analytik, Mikrobiologie, Ökologie, Sterilisation sowie der Produktzertifizierung, angewandt werden können. Die folgende Auflistung, einschließlich der darin genannten Normen, ist der Website des Labors (ISEGA 2020) entnommen:

- Einwirkung von Mikroorganismen auf verschiedene Materialien - Beständigkeit / Wirksamkeit nach DIN EN ISO 846.

- Wirksamkeitsprüfung antimikrobiell ausgerüsteter Materialien (u. a. Kunststoffen, Textilien, Papiere) z. B. nach AATCC 30 Test III, AATCC 100, AATCC 147, ASTM E 2149, ASTM E 2180, DIN 53931, DIN EN 1104, ISO 22196, JIS L 1902, JIS Z 2801.
- Bestimmung des Übergangs antimikrobieller Bestandteile - Agardiffusionsverfahren (Hemmhoftest) nach DIN EN 1104.
- Bestimmung der Oberflächenkolonienzahl von Papier, Pappe, Karton, Kunststoffen und Verbundmaterialien nach DIN 54378.
- Gesamtkolonienzahl von Papier, Pappe und Karton nach DIN 54379.
- Bestimmung von Bakterien und bakteriellen Sporen nach ISO 8784-1.
- Nachweis spezifizierter Mikroorganismen (Leitkeime) in Papier und Karton nach diversen Methoden.
- Keimdichtigkeit bei Feuchte und Luftdurchgang DIN 58953-6.

Eine weitere Norm, die in diesem Bereich zu nennen ist, findet sich in der (GOST 9.801-82) aus Russland. Diese beschreibt ein Prüfverfahren zur Pilzresistenz.

Schmutz, Brandschäden, Wasserschäden etc. sind durchaus bekannte Probleme bei der Lagerung von Dokumenten. Für diese Fälle wurden keine Normen, aber eine ganze Reihe von auf solche Schäden spezialisierten Firmen gefunden. Firmen wie Schempp Bestandserhaltung oder Klug-Conservation oder auch Einzelpersonen wie z. B. die Restauratorin Aniela Bez, die in diesem Bereich tätig sind, finden sich auch im Literaturverzeichnis. Auch die schon erwähnte Koordinierungsstelle für die Erhaltung des schriftlichen Kulturguts (KEK) an der Staatsbibliothek zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz, Unter den Linden 8, 10117 Berlin, ist in diesem Zusammenhang eine wichtige und gute Adresse. Finanziert durch die Beauftragte der Bundesregierung für Kultur und Medien (BKM) und die Kulturstiftung der Länder fördert diese Stelle Projekte, die den langfristigen Erhalt von Papierdokumenten zum Ziel haben. Themen können sowohl Bestandserhalt, Konservierung, Restauration und Reparatur als auch Dokumentenmanagement und Archivbau sein. Die Fördersummen liegen zwischen einigen tausend Euro und Beträgen über 100.000 Euro. Ein Einzelprojekt wurde sogar mit 400.000 Euro gefördert (KEK 2021).

Die Liste mit weiteren Schäden setzt die im Kapitel 3.1 begonnene Auflistung fort:

Brandschaden: Feuer oder große Hitze können zu gravierenden Schäden an Schriftgut führen oder es sogar vollständig zerstören. Eine umfassende **Notfallvorsorge** hilft, im Ernstfall schnell und zielgerichtet zu handeln. **Restaurierungen** können beschädigtes Schriftgut stabilisieren.

Farbfraß: Veränderung von Farben, die mit Metallen versetzt wurden. Häufig vertreten ist z. B. Kupferacetat, ein Kupfersalz der Essigsäure, das auch als Grünspan bekannt ist. Grünspan kam besonders in Miniaturen oder Seitenrahmen in mittelalterlichen Handschriften als grüne Farbe zum Einsatz. Chemische Abbauprozesse können **Papier** als Bild- oder Schriftträger schädigen; die Folgen sind **Korrosion** oder das Herausbrechen der betroffenen Bereiche (siehe auch **Tintenfraß**, **Kupferfraß**).

Kriegsschaden: Mittelbare und unmittelbare Folgen des Kriegs an schriftlichem Kulturgut. Dazu zählen konkrete Schadensbilder wie **Brandschäden** und **Wasserschäden** sowie Schäden durch Beschuss, Auslagerung oder Transport. Ein Kriegsschaden im eigentlichen Sinn ist momentan bei zivil-nuklearen Schriftstücken in Deutschland nicht zu erwarten.

Kupferfraß: Der zur Herstellung grüner Farbe verwendete Grünspan, das Kupferacetat, kann durch die enthaltenen Kupferionen als Katalysator zum Abbau von Papier oder Pergament werden. Besonders betroffen von diesen chemischen Abbauprozessen sind illuminierte **Handschriften** oder kolorierte Drucke.

Lästling: Bezeichnet die Anwesenheit von Tieren, die als störend empfunden wird, die aber keinen Schaden hervorrufen (siehe auch **Schädlinge**, Kapitel 3.1).

Notfall: Diese bedrohen die Erhaltung des schriftlichen Kulturguts auf vielfältige Weise: Brände, Wassereinträge oder Bauschäden zählen zu den häufigsten Notfallsituationen.

Restaurierungsschaden: Schaden an einem Objekt, der auf eine vorangegangene Restaurierungsmaßnahme zurückzuführen ist. Laminierungen von Papierseiten schaden z. B. auf lange Sicht den Objekten und sind als Restaurierungsschaden nur sehr aufwendig zu beheben. Die aktuell gültige Restaurierungsethik erhebt daher, im Gegensatz zu früher, die Reversibilität von Maßnahmen zum Prinzip.

Tintenfraß: Eisengallustinte ist die seit dem 3. Jh. v. Chr. und noch bis ins 19. Jh. meistbenutzte Tinte. Die Eisengallustinte besteht u. a. aus Galläpfeln und Eisenvitriol (Eisensulfat). Die enthaltenen Eisenionen können oxidieren und Schwefelsäure bilden, die das Papier massiv angreift und das Schadensbild **Tintenfraß** verursacht.

Wasserschaden: Massiver Feuchtigkeitseintrag kann schwere Schäden am Schriftgut verursachen. Die Bergung im Katastrophenfall erhöht zusätzlich die Gefahr von Rissen, Knicken und Verschmutzung. Werden innerhalb der ersten zwei Tage nach dem Wasserschaden keine Maßnahmen wie die Luft- oder Gefriertrocknung ergriffen, ist ein **Schimmelpilzbefall** oft unabwendbar. Ein **Notfallplan** und die Mitgliedschaft in einem **Notfallverbund** erleichtern die schnelle Behandlung geschädigter Materials (siehe auch **Feuchtigkeitsschaden**).

Der Umgang mit diesen Schäden ist im Kapitel 3.2 aufgeführt.

4 AP3: Entwicklung eines abgestimmten Systems „Papier – Schreib-/Druckstoff“

Aus der Leistungsbeschreibung ergeben sich drei konkrete Aufgaben, die in den Laborversuchen auszuführen sind:

- Ermittlung und Bewertung der zu erwartenden Schäden, wenn keine alterungsgerechte Papier/Druckfarbendruckstoffkombination verwendet wird; dies wird in Kapitel 4.1 ausgeführt
- Durchführung einer Testreihe mit repräsentativen Papier – Schreib-/Druckstoffkombinationen bei beschleunigter Alterung über 16 Monate; dies wird in Kapitel 4.2 erläutert
- Formulierung einer begründeten Empfehlung hinsichtlich der Entwicklung eines optimal abgestimmten Papier – Schreib-/Druckstoffsystems; dies hat Kapitel 4.3 zum Inhalt

Kern dieser Anforderungen ist die Testreihe. Durch Trennung in drei Kategorien – nämlich Faserstoffe, industriell hergestelltes Papier und bedrucktes Papier – können die Faktoren, die eine Alterung begünstigen oder hemmen, den Verursachern zugeordnet werden. Zudem sieht die Leistungsbeschreibung eine beschleunigte Alterung entsprechend der Konditionen schon existierenden Alterungsverfahren um 6, 12 und 24 Tage, danach monatlich bis 16 Monate vor. Im Vergleich dazu findet eine Lagerung im Prüfklimaraum (23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit) bei sachgemäßen Konditionen laut ISO 11799 (Anmerkung: besagte Norm befindet sich aktuell in der Überarbeitung; die Version ist im Stand „Committee Draft“ bis 22. März 2023 im Umfrage- und Kommentierstatus auf ISO-Ebene und dort zunächst nur den Committee-Mitgliedern zugänglich), bei 100 °C gemäß ISO 5630-5 und bei Kühlraumtemperatur (4 °C) statt. Dadurch können Vergleiche zwischen empfohlenen Lagerungsbedingungen und verschiedenen Alterungsbedingungen gezogen werden.

4.1 Zu erwartende Schäden und deren Bewertung bei Verwendung nicht alterungsbeständiger Schreibstoffe und Papiere

Da alle Papiere altern, bezieht sich die Bezeichnung „nicht alterungsbeständige Schreibstoffe und Papiere“ auf solche Papiere, die nicht die Anforderungen der ISO 9706 oder strenger (d. h. ISO 11108 oder UNI 10332) erfüllen. Für die Schreibstoffe gilt analog, dass sie nicht den Anforderungen der ISO 11798 entsprechen. Bei Erfüllung der genannten Normen geht man davon aus, dass nach heutigem Wissensstand die bestmöglichen Voraussetzungen für möglichst langsame Alterung geschaffen werden. Dennoch ist auch bei solchen Papier – Schreib-/Druckstoff-Kombinationen mit alterungsbedingten Veränderungen zu rechnen, z. B. durch Zersetzung des optischen Aufhellers, der in typischen Kopierpapieren, die die ISO 9706 erfüllen, enthalten ist. Genaueres zeigen die im Kapitel 4.4 dargestellten Messergebnisse.

Welche Schäden zu erwarten sind, hängt sowohl von der Papiersorte als auch vom Zeitraum ab, in dem das Papier verwendet und eingelagert wurde. Im Kapitel 3 wird darauf näher eingegangen. Dort sind auch die zu erwartenden Schäden beschrieben, die an Papieren auftreten, die in der Vergangenheit bereits benutzt und eingelagert wurden. In diesem Kapitel soll darum beleuchtet werden, welchen zu erwartenden Schäden man sich aussetzt, je nachdem welches Papier in Zukunft eingesetzt werden wird.

4.1.1 Zu erwartende Schäden bezüglich Handhabung der Dokumente

Zur Handhabung der Dokumente gehört das Aufschlagen und Blättern, um darin Informationen suchen und lesen zu können. Bezüglich der Handhabung ist dies die wichtigste, sicherzustellende Eigenschaft. Dazu gehören des Weiteren Aktionen wie Bereitstellen eines Dokuments, Umlagern/Umstapeln oder der Umzug eines gesamten Archivs mit Transport. Hier ergibt sich durch unsachgemäßes Behandeln die Gefahr der mechanischen Beschädigung. Letztlich fällt unter diese Kategorie auch die eventuelle Notwendigkeit, Dokumente zu reparieren, zu restaurieren oder zu duplizieren.

Nicht zu unterschätzen sind potenzielle Schäden an Dokumenten durch Klimawechsel. Alle für die Papierherstellung verwendeten Fasern sind pflanzlichen Ursprungs und als solche feuchteempfindlich. Die Fasern können bei hoher Luftfeuchtigkeit Wasser aufnehmen (Adsorption) und quellen oder bei niedriger Luftfeuchtigkeit Wasser abgeben (Desorption) und schrumpfen. Dieser Vorgang unterliegt einer Hysterese, d. h. wird eine Faser z. B. aus einem Lager mit niedriger Luftfeuchte in einen Lesesaal mit höherer Luftfeuchte gebracht, dann nimmt sie Wasser auf, gibt dieses Wasser aber nicht wieder vollständig ab, wenn sie wieder in das Lager mit niedriger Luftfeuchte zurückgebracht wird. Mehrere solcher Zyklen schädigen durch die mehrfachen Quell- und Schrumpfvorgänge durch mehrfache Ad- und Desorption das Gefüge des Fasernetzwerks. Es kommt zur Schwächung der mechanischen Eigenschaften (wie auch im Kapitel 2.1.1.3 erwähnt, siehe hierzu (Behrens et al. 1994)).

Alle Tätigkeiten während der Handhabung eines Dokuments erfordern eine mechanische Mindestfestigkeit des Papiers. Durch die Handhabungsvorgänge gerät ein Dokument zwangsläufig unter eine gewisse Zugspannung. Die wirkenden Kräfte sind nicht sehr hoch und können durch vorsichtige Handhabung niedrig gehalten werden. Dadurch ist die Gefahr, dass ein Dokument aus Papier zerrissen wird, gering. Jedoch sinkt die Festigkeit extrem, wenn das Papier brüchig und spröde wird. Dies ist von den sauer geleimten Papieren bekannt. Sollten trotz der heute vorliegenden Erkenntnisse noch sauer geleimte Papiere verwendet werden, dann ist nach einem Lagerzeitraum von spätestens 50 bis 70 Jahren von einem Zerfall des Papiers auszugehen. Solche Dokumente sollten darum nicht eingelagert werden. Sie können durch die in ihnen enthaltene Säure auch andere Papiere kontaminieren, die in der Nähe gelagert

werden, und dort Zerfallsprozesse auslösen. Falls man es mit solchen Papieren zu tun hat, wäre direkt ein Duplizieren auf alterungsbeständige Papiere angeraten. Im Stadium, wenn das sauer geleimte Papier noch nicht zerfallen ist, lässt es sich naturgemäß am einfachsten und kostengünstigsten duplizieren. Eine Entsäuerung ist dann nicht erforderlich, wenn man nicht auf die Erhaltung des Ursprungsdokuments angewiesen ist. Für kulturelles Erbe in Archiven ist dies oft gewollt. Sofern es aber nur die die Erhaltung des gespeicherten Wissens geht, ist ein Duplizieren kostengünstiger, weniger aufwendig und vollkommen ausreichend.

Gestrichene Papiere sind die nächste kritisch zu betrachtende Kategorie nicht alterungsbeständiger Papiere. Zwar mag es sein, dass die mechanische Festigkeit des Papiers durchaus auch nach langer Lagerung noch ausreichend ist und das Papier bei der Nutzung nicht zerreißt. Um jedoch die Strichpigmente, meist Calciumcarbonat, Kaolin oder Titandioxid, auf der Oberfläche des Papiers zu fixieren, müssen Bindemittel eingesetzt werden. Würde man z. B. eine Raufasertapete nur mit einem Kreide-Wassergemisch weißen wollen, dann würde die Kreide nach dem Trocknen einfach von der Oberfläche abzutragen sein. Bindemittel verhindern das, können aber mit der Zeit verspröden. Dadurch ist zu erwarten, dass beim Blättern Partikel aus der Oberfläche des Papiers herausgerissen werden. Dies führt zur Zerstörung der Oberfläche und damit des Druckbildes.

Zu den nicht alterungsbeständigen Papieren gehören auch die Recyclingbüropapiere. Deren Faserstoffzusammensetzung ist durch das jeweils aktuell im Umlauf befindliche grafische Altpapier bestimmt und somit nicht im Detail bekannt. Mit Sicherheit kann davon ausgegangen werden, dass im Altpapier holzhaltige, also Fasern mit hohem Ligninanteil, vorhanden sind. Dies beschleunigt die mechanische Alterung des Papiers und auch solcher Papiere, die mit derartigen Papieren zusammengelagert werden. Dennoch ist nicht davon auszugehen, dass die Festigkeit des Papiers so stark sinkt, dass eine Handhabung nicht mehr möglich ist. Eine starke Versprödung, wie von sauer geleimten Papieren bekannt, ist in diesem Maße nicht zu erwarten und wurde bisher auch noch nicht dokumentiert. Nicht auszuschließen ist, dass durch Verunreinigungen im Altpapier Stoffe in das Dokument gelangen können, die einer Langzeitlagerung abträglich sind. Z. B. kann dies über die Druckfarben geschehen. Mineralölbasierte Druckfarben führen zu einer Kontamination des Altpapiers mit Öl. Für andere Substanzen kann dies auch gelten. Im Aufbereitungsprozess des Altpapiers für die erneute Papierherstellung werden derartige Stoffe gezielt eliminiert, jedoch funktioniert keine Verfahrenstechnik zu 100 %. Es muss also mit Störstoffen im Altpapier gerechnet werden, die die Alterungsprozesse beschleunigen. Aus den genannten Gründen ist auf lange Zeit eine bei der Handhabung spürbare Versprödung solcher Papiere nicht auszuschließen, aber auch nicht zwingend zu erwarten.

Auch die holzhaltigen Papiere aus Frischfasern fallen in diese Kategorie. Die Messwerte an für das Projekt Labest-Papier genutzten Proben, die Lignin enthalten, lassen nicht erwarten, dass es zu solchen mechanischen Schäden kommt, dass die Handhabung der Dokumente nicht mehr möglich ist. Bei Frischfasern entfällt der Aspekt, dass über einen Recyclingkreislauf weitere unbekannte Störstoffe eingetragen wurden. Vom Typ her sind zwei holzhaltige Frischfaserpapiere zu unterscheiden.

- Beim ersten Typ wird die Eigenschaft der holzhaltigen Fasern ausgenutzt, eine gute Opazität zu besitzen, d. h. nur wenig durchscheinend zu sein. Trotz niedriger flächenbezogener Massen lassen sich solche Papiere beidseitig bedrucken, ohne dass die Rückseite auf die Vorderseite durchscheint. Auf diesem Prinzip beruht das Zeitungsdruckpapier, welches z. B. mit einer flächenbezogenen Masse von 42 g/m² hergestellt wird. Das Problem dieser Art von Papieren kann sein, dass schon die Anfangsfestigkeit so niedrig sein kann, dass nach einer Alterung keine ausreichende Restfestigkeit mehr vorhanden ist. Niedrige flächenbezogene Masse in Kombination mit ligninhaltigen Fasern lässt daher durchaus Festigkeitsprobleme erwarten. Ein Kopierpapier liegt bei 80 g/m², hat allein aufgrund der höheren Masse eine höhere Festigkeit und wird auch für höhere mechanische Belastungen im Büroalltag konzipiert, unterliegt daher nicht dieser beschriebenen Gefahr.
- Beim zweiten Typ wird zusätzlich zum gebleichten Zellstoff ein Anteil ligninhaltiger Fasern eingesetzt, um Kosten zu sparen. Zumeist handelt es sich bei der ligninhaltigen Fasern um CTMP, einem Faserstoff mit hoher Ausbeute (darum noch ligninhaltig) und gleichzeitig hoher Weiße. Diese Papiere sind als kostengünstige Variante bei den grafischen Frischfaserpapieren gedacht und können durchaus zu Dokumenten verarbeitet worden sein, die bei der zivilen nuklearen Energienutzung eine Rolle spielen. Wegen der ausreichend hohen Anfangsfestigkeit dieser Papiere ist aber ein Handhabungsproblem noch unwahrscheinlicher als bei den Recyclingpapieren.

Für manche Anwendungen kann es notwendig sein, dass das Papier oder der Karton gefaltet werden muss. Falten ist eine besondere Belastung für das Papier, jeder Faltvorgang schädigt das innere Gefüge des Papiers entlang der Faltlinie. Manche Normen für alterungsbeständige Papiere schreiben daher die Messung des Falzwidestandes vor (so die ISO 11108, die NEN 2728 oder die ISO 16245; siehe hierzu Tabelle 1 im Kapitel 2.3.5). Vor allem die Norm ISO 16245 ist hier relevant, da sie sich mit Schachteln und Foldern zur Aufbewahrung von Akten und Dokumenten beschäftigt. Zwar geht mit der allgemeinen Festigkeitsabnahme der Papiere durch Alterung auch der Falzwidestand nach unten, sogar auf unter null je nach Alterungsbedingung und Fasertyp, Schädigungen sind aber vor allem dort zu erwarten, wo häufig gefaltet werden muss. Dies sind naturgemäß die Aufbewahrungsmittel, deren Zerstörung allein jedoch keine Auswirkung auf die Dokumente hat. Sie können bei festgestellten Schäden

einfach ausgetauscht werden. Relevanter sind Knicke und Falten, wie sie etwa bei großen Zeichnungen vorkommen, damit diese z. B. in DIN A4 Größe abgelegt werden können. Das Auf- und wieder Zusammenfalten stellt eine so hohe mechanische Beanspruchung dar, dass mit einem Reißen des Papiers entlang der Faltlinien gerechnet werden muss. Papiere, die für diesen Zweck vorgesehen sind, werden daher generell mit langen Fasern aus Zellstoff hergestellt. Die Papiere reißen im Allgemeinen nicht unvorhersehbar an den Faltkanten. Jemand, der mit den Papieren umgeht und sie auffaltet, kann die Gefahr erkennen. Dann wäre ein Duplizieren des betroffenen Dokuments angebracht.

Als positives Beispiel sei ein am Fachgebiet PMV verwendetes Diagrammpapier erwähnt. Das Diagramm wird gefaltet in einer Schublade im Nasslabor gelagert, mehrmals im Monat herausgeholt und unter den rauen Arbeitsbedingungen im Labor aufgefaltet, genutzt und wieder zusammengefaltet. Der Zustand ist so, dass das Diagramm nach jetzt ca. 50 Jahren im Gebrauch noch nutzbar ist, auch wenn es Gebrauchspuren aufweist und teilweise mit Klebeband verstärkt und geflickt ist.



Abbildung 10 Papierdokument mit Faltungen (Quelle: Dr. Heinz Joachim Schaffrath)

Das Beispiel ist geeignet, um zu zeigen, dass eine „Unversehrtheit“ von Papier nicht gegeben sein muss, trotzdem der Zweck des Dokuments erhalten bleiben kann.

4.1.2 Zu erwartende Schäden bezüglich Lesbarkeit der Dokumente

Die Lesbarkeit der Dokumente ist eng mit den zu erwartenden Änderungen der optischen Eigenschaften verknüpft. Primär spielt der Kontrast zwischen gedruckter Information und Hintergrund eine wichtige Rolle. Bei der Herstellung eines Dokuments gehört die Überprüfung, ob die gewünschte Information beim Drucken/Kopieren überhaupt vollständig auf das Dokument übertragen wurde, zur notwendigen Qualitätsbeurteilung. Aus dem Alltag ist bekannt, dass z. B.

durch eine leer werdende Tonerkartusche eine Kopie zu blass sein kann oder vollständig misslungen ist. Im Folgenden muss vorausgesetzt werden, dass ein Dokument ursprünglich die beabsichtigte Information vollständig und klar lesbar beinhaltet hat.

Lesbarkeit assoziiert zunächst Schrift, aber auch Zeichnungen, bei den vor allem für unterschiedliche Elemente unterschiedliche Strichstärken verwendet werden, müssen gelesen werden können. Z. B. werden für Bemaßungslinien dünnere Strichstärken verwendet als für Bauteilkanten. In der Ursprungszeichnung ist dies gut zu erkennen. Verblassen die verwendeten Schreibstoffe jedoch oder verdunkelt sich das Papier über die Zeit, kann die Information „Strichstärke“ verloren gehen. Zeichnungen wären dann nicht mehr so gut zu lesen wie ursprünglich, eventuell könnte es sogar zu Fehlinterpretationen kommen. Vor allem bei Blaupausen ist mit dieser Beeinträchtigung zu rechnen und sollten daher in Zukunft vermieden werden

Des Weiteren werden auch Farben zur Informationsübermittlung herangezogen. Sei es, um bestimmte Informationen farblich hervorzuheben, sei es, um gleiche Kategorien von zusammenhängenden Informationen deutlich zu machen (z. B. die unterschiedlich gefärbten Balken in einer graphisch dargestellten Messreihe, bei der gleiche Farbe Zusammengehörigkeit bedeutet). Sofern auf die Lichtechtheit der verwendeten Farben geachtet wurde, sind keine Probleme zu erwarten. Bei Thermodruckern aber ist nicht auszuschließen, dass es bei Langzeitlagerung zu Nachreaktionen kommt und Farben nicht mehr oder nicht mehr gut unterschieden werden können. Ähnlich ist auch bei Farbfotos damit zu rechnen, dass die chemischen Reaktionen, die zur Farbgebung führen, umkehrbar sind und ein Verblassen von Farben und Kontrast zu erwarten ist.

Dies gilt prinzipiell für alle schriftgebenden oder Druckverfahren, bei denen durch chemische oder thermische Reaktionen der Informationsgehalt übertragen wird. Neben den Thermodruckern ist auch auf Selbstdurchschreibepapiere hinzuweisen. Hier reagieren zwei Flüssigkeiten miteinander, die sich in getrennten Kapseln befinden, welche unter dem Druck einer Kugelschreibespitze platzen und durch die Reaktion beider Flüssigkeiten das Schriftbild erzeugen. Solche Verfahren, die nachreagieren können, sind zu vermeiden. Sofern die DIN ISO 11798 oder die Dienstordnung Notare (DONot 2020) beachtet werden, sind Schreibstoffe, die diese Gefahr beinhalten, ausgeschlossen.

Auch wasserlösliche Farben, z. B. Tinten in Füllern oder wasserbasierende Druckfarben, können unter unglücklichen Umständen zu Informationsverlusten führen, wenn die Dokumente so feucht geworden sind, dass die Tinte verlaufen konnte.

Manche Toner minderer Qualität können zu Farbabrieb führen, was sich im Verblässen der Schrift und im Verschmutzen unbedruckter Stellen äußern kann. Mit Beachtung der angesprochenen Normen zu Farben sowie zusätzlich der Norm, welche die Mindestanforderungen an die Kombination Papier und Toner festlegt (DIN EN 12281), kann dieser Gefahr begegnet werden.

Fast alle Papiere sind optischen Beeinträchtigungen durch Alterung ausgesetzt. Zum einen ist bei ligninhaltigen Fasern mit Vergilbung zu rechnen, einer Reaktion, die vor allem unter Lichteinwirkung und Temperatureinwirkung stattfindet. Diese Veränderung tritt nicht überall gleich auf. Dokumente vergilben von Rand her, je nach Eindringtiefe des Lichts von außen. So vergilben die obersten Blätter von Dokumentenstapeln stark mit abnehmender Tendenz bei jedem Blatt, welches tiefer im Stapel liegt. Innen im Stapel ist die Blattmitte nicht vergilbt, am Blattrand lässt sich die Vergilbung nach innen hin abnehmend ebenfalls erkennen. Dieser Schaden ist bei lichtdicht verpackten und gelagerten Dokumenten nicht zu erwarten.

Zum anderen vergilben auch ligninfreie Fasern, wenn sie mit optischem Aufheller hergestellt wurden. Optischer Aufheller ist eine in grafischen Papieren weitverbreitete Hilfschemikalie, mit Hilfe derer ultraviolettes Licht in sichtbares Licht im Blaubereich umgewandelt wird. Optischer Aufheller baut sich über die Zeit abiotisch ab, ein Vorgang, der durch UV-Licht beschleunigt wird. Durch die Abnahme von Blau driftet die Farbe eines solchen Papiers auch mehr ins Gelbliche. Während bei der Vergilbung von Lignin auch subjektiv eine Zunahme des gelblich-bräunlichen Farbeindrucks festzuhalten ist, verschiebt sich der subjektive Farbeindruck beim Abbau des optischen Aufhellers eher ins Graue. Im Allgemeinen geht dies nicht mit einem Informationsverlust einher. Auf optischen Aufheller könnte idealerweise verzichtet werden, da die Langzeitwirkung seiner Zersetzung auf Dokumente unklar ist. Außer der Veränderung des Farbeindrucks ist aber bisher kein weiterer Nachteil bekannt. Den Verzicht auf optischen Aufheller vorzuschreiben wäre technisch möglich, würde aber den Rückgriff auf eine Spezialsorte kreieren, was Verfügbarkeit senkt und Kosten erhöht.

Farbabrieb, Ausbluten, Zusammenkleben von Seiten bei gestrichenen Papieren, Herauslösen von Strich- oder Bindemittelpartikeln oder das Abblättern von unzureichend gebundenen Farben oder Lacken führt zu optischen Beeinträchtigungen bis hin zur Unleserlichkeit. Mit diesen Problemen muss gerechnet werden, wenn die bereits genannten Normen und Vorschriften für Farben, Kopien und Drucke hinsichtlich der Langzeithaltbarkeit nicht beachtet werden.

4.2 Erarbeitung einer Testreihe – Auswahl repräsentativer Schreib- und Druckstoffe

Wie Eingangs zum Kapitel 4. Ausgeführt, wird bei der Testreihe in Faserstoffe als Basis für die Papierherstellung, in unbedruckte Industripapiere und in bedruckte Industripapiere untergliedert. Dies dient der Erarbeitung der Basis, auf der begründete Empfehlungen für Papier – Schreib-/Druckstoffkombinationen gegeben werden können.

Die Faserstoffbasis wird variiert, indem aus den Grundkomponenten Holzstoff (= ligninhaltige Fasern; CTMP), gebleichter Zellstoff (NBSK) und Linters (= Hadern) Laborpapiere produziert werden. Die Auswahl erfolgt so, dass zu den Laborpapieren korrespondierend auch marktübliche Industripapiere erhältlich sind. Näheres findet sich unter Kapitel 4.2.1.

Die Auswahl an Industripapieren richtet sich nach der marktüblichen Einteilung holzhaltig (= ligninhaltig) und holzfrei (d. h. Lignin wurde durch Zellstoffkochung und Bleiche entfernt oder die Fasern enthalten a priori kein Lignin, wie z. B. Linters) sowie gestrichen und natur (= ungestrichen). Holzhaltig entspricht nicht der Empfehlung nach ISO 9706 für ein alterungsbeständiges Papier. Die Nutzung von Recycling-Kopierpapier (ein Beispiel für ein holzhaltiges Papier) ist jedoch weit verbreitet und wird auch vom BASE betrieben. Schon deswegen ist die Untersuchung im Rahmen dieses Projektes geboten. Auch gestrichene Papiere werden von einigen Normen für alterungsbeständige Zwecke verworfen. Allerdings ist davon auszugehen, dass Broschüren oder Handbücher auf gestrichenem, eventuell sogar holzhaltigem Papier gedruckt wurden. Deswegen ist die Untersuchung solcher Kombinationen, die allein auf Basis der Literaturrecherche und der Normenlage abgelehnt werden müssten, ebenfalls nötig. Auch ein hadernbasiertes Papier wird in die Untersuchung aufgenommen. Die ausführliche Beschreibung findet sich unter Kapitel 4.2.2.

Im Kapitel 4.2.3 sind einige dieser Industripapiere mit gängigen Druckverfahren und gängigen Farbsystemen bedruckt worden. Die mögliche Variantenvielfalt ist hier extrem groß, da es viele Firmen zur Druckfarbenherstellung gibt, die alle mit unterschiedlichen Rezepturen arbeiten. Da nicht alles abgedeckt werden kann, beschränkt sich die Untersuchung in diesem Bereich auf die wichtigsten Druck- und Kopierverfahren. Farben werden nur durch jeweils eine Farbserie repräsentiert. Dies ist ausreichend, da der Problematik der Alterung von Farben und Schreibmitteln umfassend in Dokumenten wie der Dienstordnung für Notare (DONot 2020), DIN ISO 12040 (behandelt die Lichtechtheit von Drucken und Druckfarben), DIN ISO 12757-2 (behandelt die Anwendung von Kugelschreibern in Dokumenten), DIN ISO 14145-2 (behandelt die Anwendung von Rollerball-Stiften in Dokumenten), ISO 27668-2 (behandelt die Anwendung von Gelstiften) oder DIN ISO 11798 (behandelt die Alterungsbeständigkeit von Schriften, Drucken und Kopien auf Papier) entgegengetreten wird.

Die Auswahl einiger Papier-Sondersorten richtet sich nach speziellen Fragestellungen, da z. B. in der Vergangenheit technische Zeichnungen auf Transparentpapier mit Tusche gezeichnet und über Durchlichtverfahren vervielfältigt wurden. Früher war es zudem üblich, Korrekturflüssigkeit zu verwenden. Dokumente werden gestempelt und mit handschriftlichen Anmerkungen versehen. Diese in der Leistungsbeschreibung geforderten Details werden in diesem Zusammenhand mitgeprüft und sind unter Kapitel 4.2.4 dargestellt. Im gleichen Kapitel finden auch Papiere Erwähnung, die real über 20 Jahre und mehr gealtert sind.

Die Zeitvorgaben der Leistungsbeschreibung für eine Testreihe im Rahmen bereits existierenden Alterungsverfahren werden bei den Laborpapieren aus Zellstoff (NBSK; siehe Kapitel 4.2.1) und Büropapier gemäß ISO 9706 unbedruckt (siehe Kapitel 4.2.2) sowie selbiges mit Trockentoner bedruckt (siehe Kapitel 4.2.3) strikt eingehalten. Alle diese Substrate werden zur Vermeidung von Kreuzkontamination in Alufolie verpackt.

Um die Anzahl der Messungen und vor allem die Menge an benötigtem Substrat in handhabbaren Grenzen zu halten, muss bei den anderen Substraten davon abgewichen werden. Verzichtet wird in dem Fall auf die Messung nach 6 Tagen sowie auf die monatlichen Messungen. In Absprache mit dem BASE wird statt monatlich quartalsweise gemessen. Dies schafft den nötigen Platz im Klimaschrank (80 °C/65 % LF), um ein repräsentatives Spektrum an Papieren in der vorgegebenen Zeit und mit dem geplanten Budget messen zu können.

4.2.1 Im Labor aus gängigen Rohstoffen hergestellte Papiere

Laborblätter sind hinsichtlich Zusammensetzung und Herstellverfahren durch normgerechte Herstellung (DIN EN ISO 5269-2) ausreichend beschrieben. Damit dienen sie als Referenz und Vergleichsmuster gegen industriell hergestellte Papiere. Sie werden mit Frischwasser (Leitungswasser) ohne weitere Additive (keine Leimungsmittel, keine Retentionsmittel etc.), nur mit einem Zusatz von ca. 3 % CaCO₃ als gewollte Alkalireserve hergestellt. Die beobachteten Effekte bleiben so auf den zu untersuchenden Faserstoff beschränkt, Einflüsse durch Additive können ausgeschlossen werden. Für die weiteren Messungen der physikalischen Eigenschaften wird die entsprechende Norm (DIN EN ISO 5270) herangezogen. Um die bei der Papierherstellung übliche Beeinflussung durch mechanische Effekte zu simulieren, werden die Zellstoffe auf einen Mahlgrad von ca. 25 SR gemahlen. Das bedeutet, die Fasern werden so mechanisch in einem Laboraggregat (Laborrefiner LR40) gemahlen, dass ihr Zustand in etwa dem entspricht, wie er in der industriellen Papierherstellung angestrebt wird.

Hergestellt werden, jeweils mit CaCO₃-Anteil als Alkalireserve, aber ohne weitere Additive:

1. Laborblatt aus Lintersfasern: Dieses repräsentiert den nach Literatur zu erwartenden alterungsresistentesten Faserstoff. Er umfasst sowohl die Anforderungen gemäß ISO 9706 als auch gemäß ISO 11108:

-
2. Laborblatt aus CTMP: Dieses repräsentiert einen modernen, jedoch ligninhaltigen Faserstoff. Er wäre nach ISO 9706 ungeeignet und repräsentiert damit die nicht zu empfehlende Variante, quasi die Gegenthese und damit das komplementäre Papier zu Linters.
 3. Laborblatt aus gebleichtem Nadelholzsulfatzellstoff (NBSK): Dieses repräsentiert den nach Literatur unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit empfohlenen bzw. nach ISO 9706 geeigneten Faserstoff hinsichtlich Alterungsbeständigkeit. Die Verfügbarkeit dieses Faserstoffs auf dem Markt ist deutlich besser als bei Linters.

Alle Laborblätter werden während der Herstellung und Messung nur mit Baumwollhandschuhen angefasst, um eine Kontamination mit Schweiß auszuschließen.

Die Laborblätter werden sortenrein in Alu-Folie verpackt gealtert. Dadurch soll eine Kreuzkontamination vermieden werden. Als Referenz wird das gebleichte Papier aus gebleichtem Nadelholz-Sulfatzellstoff zusätzlich unverpackt gealtert. Es entspricht auf Laborblattebene einem Büropapier, welches die Anforderungen der ISO 9706 erfüllt. Gleiches Papier wird in der in Alu-Folie verpackten Version im vollen Umfang gemäß der Leistungsbeschreibung gealtert, die anderen Varianten nur quartalsweise, um den Probenumfang handhabbar zu halten. Zur Abschätzung des Einflusses der Kreuzkontamination wird zudem eine Mischung aus Laborblättern verschiedenen Fasertyps in Alu-Folie verpackt gealtert. Alterung und Begleitmessung erfolgen gemäß ISO 20494 (also 0 Tage und 12 Tage Alterung), quartalsweise sowie nach 16 Monaten. Zum Vergleich werden auch Alterungen nach DIN EN ISO 5630-5 (bei 100 °C) und die Lagerung bei 4 °C durchgeführt

Nicht gemessen werden Laborblätter aus Laubholzzellstoff, aus Sulfitzellstoff, aus TMP und aus Deinkingstoff (aus Altpapier, bei dem die Druckfarbe = Ink entfernt wurde; der Vorgang der Druckfarbentfernung heißt „Deinking“ und macht das Altpapier wieder für graphische Zwecke geeignet).

Begründung: Der Einfluss verschiedener Faserstoffe (Laubholz, Sulfitzellstoff und Holzstoff, hier TMP) auf die Alterung ist in der Literatur (wie ausführlich im Arbeitsstandbericht AP1 dargestellt) ausreichend beschrieben, um von den hier ausgewählten Substraten auch auf diese Faserstoffe schließen zu können. Eine Ausnahme würde der Deinkingstoff aus Altpapier darstellen. Jedoch ist hier wiederum naturgemäß die Zusammensetzung nicht sicher reproduzierbar. Da die Laborblätter als Referenz dienen und es im Projekt „Labest Papier“ nicht um das Verhalten von unter Laborbedingungen hergestellten Papieren aus Altpapier geht, wird diese Variante nicht mitgetestet.

4.2.2 Gängige Industripapiere, unbedruckt, mit Berücksichtigung der Langzeitbeständigkeit

Zum einen beziehen sich alle Empfehlungen in den Normen zur Alterungsbeständigkeit zunächst auf das unbedruckte Papier, zum anderen dienen die unbedruckten Proben als Vergleichsmuster gegen bedruckte Proben (d. h. einige der Papiere werden auch bedruckt gealtert und getestet). Die Testreihe bildet die in der Leistungsbeschreibung geforderte Untersuchung aussichtsreicher Papiersorten ab und dient der Ermittlung der zu erwartenden Schäden.

Getestet werden:

1. Hadernpapier (Papier aus Baumwollfasern = Linters) der Firma Hahnemühle, konkret die Sorte „Skizze/Pastell, 125 g/m²“. Dieses Papier erfüllt gemäß ISO 11108 höhere Anforderungen an die Alterungsbeständigkeit als gemäß ISO 9706 getestete Papiere. Das Äquivalent auf Laborblattebene ist das Linterslaborblatt. Die hier getestete Sorte ist ohne Zusatz von optischem Aufheller hergestellt. Dies eliminiert eine mögliche Quelle für optische Alterung, da sich optischer Aufheller mit der Zeit zersetzt, so seine Wirkung verliert und das Papier „vergilbt“.
2. Handelsübliches Büropapier auf Recyclingbasis (mittlere Qualität) der Firma Steinbeis, konkret die Sorte „TrendWhite, 80 g/m²“. Dieses repräsentiert ein modernes, jedoch ligninhaltiges Papier. Zudem ist es identisch dem Papier, welches derzeit beim BASE im Einsatz ist, wenn auch unter dem Markennamen „Recyconomic® TrendWhite“ des Händlers Papyrus. Das Papier enthält durch den Recyclingkreislauf unbekannte Inhaltsstoffe, welche durch die Messung der flüchtigen Anteile (VOC = volatile organic compounds) als neuer Messmethode während des Projektes erfasst werden. Unter anderem enthält Recyclingpapier durch den Papierkreislauf immer einen Anteil an optischem Aufheller, selbst wenn er – wie nach den Kriterien für den Blauen Engel gefordert (Vergabekriterien DE-UZ 14a) – nicht explizit zugesetzt wird. Auf Laborblattebene ist dieses Industripapier in gewissem Maße durch das CTPM-Laborblatt abgebildet, jedoch nur durch den Ligningehalt.
3. Handelsübliches Büropapier aus gebleichtem Sulfatzellstoff, welches die Kriterien nach ISO 9706 erfüllt, der Firma UPM Nordland, konkret die Sorte „UPM Office Multifunction, 80 g/m²“. Dieses Papier ist vermutlich das, welches bevorzugt für alterungsbeständige Dokumente verwendet werden sollte. Es enthält optischen Aufheller, der sich je nach Lagerbedingungen schnell oder langsam zersetzen kann und so den Farbort des Papiers vom Bläulichen ins Gelbliche verschiebt, was als „Vergilbung“ oder „Weißgradabnahme“ gemessen werden kann. Das Äquivalent auf der Laborblattebene ist das Blatt aus gebleichtem Nadelholzsulfatzellstoff.

4. Speziell für Foto- und CAD-Zwecke geeignetes Inkjet-Papier der Firma Felix Schoeller, konkret die Sorte „Attract base, uncoated surface-treated, 80 g/m²“. Dieses ist ein handelsübliches Spezialpapier mit besonderer Oberfläche für gute Druckqualität. Es enthält optischen Aufheller und hat eine Oberflächenbeschichtung, deren vom Hersteller nicht veröffentlichte Zusammensetzung sich auf das Alterungsverhalten auswirken könnte.
5. Handelsübliches holzfreies (d. h. ligninfreies) gestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier, konkret die Sorte „SAPPI Magno Gloss, 170 g/m²“ des Papierhersteller SAPPI. Dieses Papier ist gestrichen, kann im Offset- wie im Tiefdruckverfahren bedruckt werden und wird für hochwertige Broschüren oder Handbücher eingesetzt. Die Literaturrecherche (siehe Arbeitsstandbericht AP1) und Diskussionen im Normenausschuss NA 009-00-14 AA "Bestandserhaltung in Archiven und Bibliotheken" haben ergeben, dass gestrichene Papiere generell nicht für die Langzeitlagerung empfohlen werden. Dies liegt vor allem daran, dass die Auswirkungen und das Verhalten der Bindemittel, welche die Weißpigmente an das Papier heften, noch nicht erforscht sind. Insofern repräsentiert diese Variante a priori keine empfehlenswerte. Jedoch kann sich die Kenntnis über das Verhalten dieses Papiers (vor allem auch in der bedruckten Version, siehe Kapitel 4.2.3) im Laufe des Projektes Labest Papier erhöhen, wodurch eine Empfehlung möglich werden könnte. Außerdem ist damit zu rechnen, dass diese Papiersorte bereits in der Vergangenheit eingesetzt wurde und vermutlich auch in Zukunft genutzt werden wird. Kenntnisgewinn hierzu ist daher im Projekt Labest Papier sinnvoll. Des Weiteren entspricht die Aufnahme dieser Sorte der Anforderung der Leistungsbeschreibung, Testreihen an einer geeigneten Anzahl repräsentativer Papier-Schreib-/Druckstoffkombinationen durchzuführen. Das Papier enthält optischen Aufheller.
6. Handelsübliches holzhaltiges (d. h. ligninhaltiges) gestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier, jedoch ligninhaltig, konkret die Sorte „Speed Gloss, 90 g/m²“ des Papiergroßhändlers Igepa. Dies ist eine übliche Variante für glänzende Broschüren oder Handbücher. Für diese Papiersorte gilt das Gleiche wie oben aufgeführt, sie ist wegen des Strichs und seiner Bindemittel nicht a priori empfehlenswert. Hinzu kommt, dass diese Sorte ligninhaltig ist, was die Alterungsbeständigkeit noch mehr in Frage stellt und laut Literaturrecherche vermieden werden soll. Da es aber ein im Offset- und Tiefdruck eingesetztes Massenpapier ist, muss mit der Nutzung dieses Papiers in der Vergangenheit und in Zukunft zwingend gerechnet werden. Aussagen zu dieser Sorte sind daher essenziell, sowohl was eine mögliche Empfehlung zur Einsetzbarkeit dieses Papiers angeht als auch was die Abschätzung zu erwartender Schäden bereits in den Archiven liegender Papiere angeht. Das Papier enthält optischen Aufheller.

-
7. Handelsübliches holzhaltiges (d. h. ligninhaltiges) ungestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier (auch als „Naturpapier“ bezeichnet), konkret die Sorte „Munken Print White 15, 80 g/m²“ des Papiergroßhändlers Igepa. Auch dies ist eine handelsübliche Variante für Broschüren und Handbücher. Hier gilt wiederum, dass diese Papiersorte nicht zu empfehlen ist. Zwar fällt das Bindemittel des Strichs als störende Komponente weg, der störende Ligninanteil jedoch bleibt. Zudem sind alle Magazinpapiere (auch die unter 5. und 6. genannten) üblicherweise durch Druck und Temperatur geglättet worden (quasi wie Bügeln; der technische Prozess nennt sich „Kalandrieren“), was zu einer Verdichtung der Papierstruktur führt. Dies wiederum vermindert theoretisch die Möglichkeit, dass sich beim Alterungsprozess ausbildende Autooxidationsprodukte (genauere Erläuterungen siehe Arbeitsstandbericht AP1) entweichen können, was den Alterungsprozess beschleunigt. Gemäß Leistungsbeschreibung soll diese Papiersorte aber mitgetestet werden, um zu erwartende Schäden an Handbüchern oder ähnlichen Druckprodukten abschätzen zu können. Das Papier enthält optischen Aufheller.
 8. Handelsübliches Bibeldruckpapier (holzfreies Dünndruckpapier niedriger flächenbezogener Masse), konkret die Sorte „Fehsam 39 LS 3739, 39 g/m²“ des Papierherstellers Glatz. Derartige Papiere sind sehr dünn und leicht, werden jedoch ligninfrei und alterungsbeständig gemäß ISO 9706 angeboten. Allerdings sind diese Papiere nicht als Büropapier tauglich, da sie die Laufeigenschaften in Kopiergeräten nach DIN EN 12281 nicht erfüllen. Für Handbücher könnten sie jedoch in Frage kommen. Des Weiteren sind diese Papiere ebenfalls kalandriert, d. h. sehr dicht, was, wie schon erwähnt, zumindest theoretisch das Entweichen von Autooxidationsprodukten verzögert und so eine Alterung beschleunigen könnte. Allerdings werden derartige Papiere nicht mit optischen Aufhellern versehen. Das unterscheidet sie zusätzlich von ISO 9706 konformen Papieren, wie oben in dieser Aufstellung erwähnt, und macht sie eher vergleichbar mit den Hadernpapieren.

Die Papiere werden in Alufolie eingewickelt gealtert. Alterung und Messung wird an allen Papieren gemäß ISO 20494 (0 und 12 Tage), jedes Quartal sowie nach 16 Monaten durchgeführt. Das voraussichtlich zu empfehlende holzfreie Büropapier soll entsprechend der Leistungsbeschreibung zusätzlich nach 6 und 24 Tagen sowie monatlich getestet werden. Zum Vergleich werden auch Alterungen nach DIN EN ISO 5630-5 (bei 100 °C) und die Lagerung bei 4 °C durchgeführt.

Die Probenauswahl ist repräsentativ. Die gängigen Papiersorten, natur und gestrichen, ligninfrei und ligninhaltig, sind vertreten. Die Aussagen der an der Auswahl gefundenen Papiere lassen sich auf die nicht vertretenen Papiere, welche Abwandlungen der hier vertretenen Papiere darstellen, übertragen.

Nicht gemessen werden Recyclingpapiere niedriger Qualität (die Repräsentanz dieser Gruppe ist durch das Recyclingpapier mittlerer Qualität gegeben) und holzfreie (d. h. ligninfreie) Büro-papiere, die nicht der ISO 9706 entsprechen (da entsprechend der Literatur diese Papiere hinsichtlich Alterungsbeständigkeit nicht zu empfehlen sind).

Nicht getestet werden zudem Spezialpapiere wie:

- Wertpapiere: Diese Papiere bestehen aus Hadern und wären durch das Hahnemühle-Papier (siehe 1.) repräsentiert. Sie erfüllen nicht die Laufeigenschaften für Büropapiere nach DIN EN 12281, kämen aber für Handbücher in Frage. Als Spezialpapiere sind sie recht teuer. Ihre prinzipielle Eignung kann über die ausgewählten Papiere beurteilt werden.
- Lamine: Dabei handelt es sich um Papiere, die im Verbund mit anderen Materialien hergestellt werden (Kunststoff- oder Aluminiumbeschichtungen etc.). Derartige Papiere sind als Verpackungsmittel gedacht, können zwar zu Werbezwecken auch hochwertig bedruckt werden, sind aber nicht für die Büroanwendung unter Einhaltung der DIN EN 12281 geeignet.
- Verpackungspapiere: Diese sind nicht für die Gestaltung von Dokumenten oder sonstigen Schriftstücken konzipiert. Relevanz haben diese Papiere als Schutzmaterial für Archivgut. Als solche sind sie über die DIN ISO 6245 spezifiziert. Verpackungsbelange sind aber in der Leistungsbeschreibung nicht erwähnt. Erkenntnisse zu möglichen Kreuzkontaminationen durch Verpackungspapiere auf Schriftgut sind durch die Versuchskonzeption bei den berücksichtigten Papieren (insbesondere durch die sorten-reine Verpackung in Alu-Folie) abgedeckt.
- Tissuepapiere sowie andere Spezialpapiere (Filterpapier, Isolatorpapier, Tapetenroh-papier, Indikatorpapier, geprägte Papiere, Dekorpapier etc.), da im Zusammenhang mit dem Projekt Labest-Papier keine Relevanz erkennbar ist.

4.2.3 Gängige Industriepapiere, bedruckt in gängigen Verfahren und Farbsystemen, mit Berücksichtigung der Langzeitbeständigkeit

Diese Testreihe deckt die gemäß Leistungsbeschreibung geforderte Untersuchung der gängigen Schreib-/Druckstoffe ab. Entsprechend liegt der Fokus auf den Druckfarben und den Druckverfahren. Die aufgeführten Papiere entsprechen den im Kapitel 4.2.2 genannten. Von den Probedrucken wurden die Kopien mit Trockentoner am Fachgebiet PMV angefertigt. Die Drucke mit Flüssigtoner wurden von HP Industrial Graphics EMEA geliefert. Die Drucke wurden auf einer Referenzmaschine in Spanien angefertigt. Alle anderen Probedrucke wurden von Fachgebiet IDD (Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren) an der TU Darmstadt angefertigt.

Getestet werden:

1. Handelsübliches Büropapier, welches die Kriterien der ISO 9706 erfüllt (UPM Office Multifunction, 80 g/m².), bedruckt mit zwei Inkjet-Formulierungen, wodurch die beiden grundsätzlichen Typen Farbstofftinte (für Bürodrucker) und Farbpigmenttinte (für Plotter) abgedeckt werden. Des Weiteren kommt ein Kopierer mit Trockentoner zum Einsatz, insgesamt werden mit dem Papier also drei Substrate angefertigt. Das Druckmotiv ist repräsentativ (gemäß INGEDE-Testprintvorlage zum Einsatz für Inkjet) und mehrfarbig, die ausgewählten Druckfarbentypen repräsentieren den Querschnitt des heutigen Bürostandards. Die Auswahl aus den vielen handelsüblichen Druckfarbenformulierungen bzw. Bürosystemen erfolgte zusammen mit dem Fachgebiet IDD (Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren) der TU Darmstadt und wurde dem BASE zur Zustimmung vorgestellt. Beim Trockentoner fällt die Wahl auf den am PMV vorhandenen Xerox Workcenter 7875 PS und den von Xerox empfohlenen Tonerkartuschen (Cyan, Magenta, Yellow und Black). Bezüglich des Inkjet-Typs für Bürodrucker (Farbstofftinte; Bezeichnung im Projekt Labest-Papier „Inkjet A“) kommt ein Inkjetdrucker HP OfficeJet 7110 mit dem zugehörigen Set aus 5 Druckfarben zum Einsatz. Bei der Inkjet-Formulierung für die Farbpigmenttinte (Plottertinte; Bezeichnung im Projekt Labest-Papier „Inkjet B“) fällt die Wahl auf den Inkjetdrucker Typ Epson PC-600 mit dem zugehörigen Set aus 9 Druckfarben. Die entsprechende Wahl erfolgt, weil dies einen jeweiligen marktüblichen Standard repräsentiert.
2. Handelsübliches holzfreies (d. h. ligninfreies) gestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier (SAPPI Magno Gloss, 170 g/m²), bedruckt mit einer handelsüblichen 4-Farben-Offsetfarbformulierung (Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz; Farbserie ECO Exel Process von Saphira; Offset Druckmaschine Rotaprint R37) sowie mit Flüssigtoner (Referenzmaschine von HP Industrial Graphics EMEA), also zwei Substrate. Die Eignung gestrichener Papiere wird in der Literatur und Fachwelt generell als fraglich angesehen (siehe hierzu die Ausführungen u.a. im Kapitel 4.2.2), da der Einfluss der beim Streichen eingesetzten Bindemittel auf die Alterung unbekannt ist. Durch diese Testreihe sollen im Rahmen des Projektes Labest Papier weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Gedruckt wird ein repräsentatives, farbiges FOGRA-Testprint Motiv. Die Auswahl der handelsüblichen Druckfarbe erfolgte zusammen mit dem Fachgebiet IDD der TU Darmstadt und wurde dem BASE zur Zustimmung vorgestellt. Die Offset-Druckmaschine entspricht dem aktuellen Stand der Technik, der Flüssigtonerdruck ist eine Neuentwicklung, die dem Digitaldruck Vorschub leisten soll.

-
3. Handelsübliches holzhaltiges (d. h. ligninhaltiges) gestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier (Speed Gloss, 90 g/m²), bedruckt mit einer handelsüblichen 4-Farben-Tiefdruckfarbformulierung (Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz; Labor-Tiefdruckmaschine des Fachgebiets IDD). Dies wäre nicht für alterungsbeständige Dokumente zu empfehlen, soll aber gemäß einem Punkt der Leistungsbeschreibung (Bewertung zu erwartender Schäden an nicht alterungsbeständigen Materialien) mitgetestet werden. Gedruckt wird ein vom Fachgebiet IDD vorgeschlagenes Motiv für Tiefdruck. Die Auswahl der handelsüblichen Druckfarbe erfolgte ebenfalls auf Empfehlung des IDD und wurde dem BASE zur Zustimmung vorgestellt.
 4. Handelsübliches holzhaltiges (d. h. ligninhaltiges) ungestrichenes Offset- & Tiefdruckpapier (Munken Print White 15, 80 g/m²). Hier gilt ebenfalls., dass dieses Papier nicht zu empfehlen ist, gemäß Leistungsbeschreibung zur Ermittlung der zu erwartenden Schäden aber mitgetestet werden soll. Bedruckt wird mit einer handelsüblichen 4-Farben-Offsetfarbformulierung (Cyan, Magenta, Yellow und Schwarz; Farbserie ECO Exel Process von Saphira; Offset Druckmaschine Rotaprint R37) ein repräsentatives, farbiges FOGRA-Testprint Motiv. Die Farb- und Druckmaschinenwahl entspricht der Variante mit holzfreiem Papier (siehe Punkt 2.)
 5. Bibeldruckpapier (Fehsam 39 LS 3739, 39 g/m²). Dieses Papier wird in seiner Verwendung für Bibeln, Gesangbücher und Gesetzessammlungen überwiegend nur mit Schwarz und im Tiefdruck bedruckt. Daher wird auch im Rahmen des Projektes Labest-Papier nur mit Schwarz auf der Labortiefdruckmaschine des IDD mit dem schon beim holzhaltigen Papier verwendeten Druckmotiv bedruckt (siehe Punkt 3).

Die Testdrucke werden in Alufolie eingewickelt gealtert. Alterung und Messung erfolgt an allen Papieren gemäß ISO 20494 (0 und 12 Tage) sowie jedes Quartal nach 16 Monaten. Das voraussichtlich zu empfehlende holzfreie Büropapier wird entsprechend der Leistungsbeschreibung zusätzlich nach 6 und 24 Tagen sowie monatlich getestet, wobei man sich hier auf die Variante „Trockentoner“ konzentriert, da diese im Büroalltag am häufigsten zu erwarten ist. Die anderen Varianten werden nach 0 Tagen, 12 Tagen, quartalsweise und nach 16 Monaten getestet. Insgesamt kann dadurch, dass man nicht an allen Papieren die gesamte Alterungsreihe durchmisst, das Probenvolumen gesenkt werden. Letztlich müssen die Proben noch Platz im Klimaschrank finden und Kosten für die Messungen müssen im budgetierten Rahmen gehalten werden.

Die Probenauswahl ist repräsentativ. Die gängigen Druckverfahren mit ihren Farben sind vertreten. Die Auswahl lässt voraussichtlich Aussagen zu den zu erwartenden Schäden und zur Alterungsbeständigkeit der Papier-Druckfarbe-Kombination zu. Die Aussagen lassen sich auf

Handbücher und Broschüren sowie Hochglanzpapier übertragen. Die mögliche Variabilität dieser Papierprodukte hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung ist abgedeckt.

Nicht getestet werden Lacke, Sonderfarben, Siebdruck, Thermodruck, Stifffarben und Sonderdruckverfahren.

Begründung: Aus der Literaturrecherche hat sich keine Notwendigkeit ergeben, die genannten Schreib-/Bedruckstoffe in Betracht zu ziehen. Ausnahmen sind Stifte wie Kugelschreiber oder Fineliner. Sie werden bei den Sondersorten in Kapitel 4.2.4 berücksichtigt, ebenso der Thermodruck und Stempelfarbe.

4.2.4 Sondersorten und Sonderbedingungen

Diese Testreihe dient vornehmlich der in der Leitungsbeschreibung geforderten Ermittlung der zu erwartenden Schäden bei fortgesetzter Alterung. In der Mail vom 21. September wurden vom BASE insbesondere folgende Papiere bzw. Zusatzstoffe erwähnt:

1. Handbücher und Hochglanzpapier: Diese sind in den in den Kapiteln 4.2.2 bzw. 4.2.3 aufgeführten Papieren.
2. Transparentpapier, Thermopapier, Fotopapier und Blaupausen, bedruckt, beschrieben (mit Fineliner, Bleistift, Kuli oder Stempelfarbe): Keines der hier genannten Papiere kann vor dem Hintergrund der erforderlichen Alterungsbeständigkeit empfohlen werden. Es kann bei den Messungen also nur um die zu erwartenden Schäden gehen. Die Papiere sind auch nicht mehr gängig, die dafür genutzten Druckverfahren auch nicht mehr (außer Thermopapier). Zu Thermopapier ist eine Stellungnahme ohne Tests möglich, da die Papiere aus Prüfaufträgen am Fachgebiet PMV bekannt sind. Hinsichtlich des Transparentpapiers und der Blaupausen hat das Fachgebiet PMV Material aus einem Ingenieurbüro bekommen, welches für Alterungsversuche verwendet werden kann. Fineliner, Bleistift, Kuli und Stempelfarbe werden an alten (älter als 20 Jahre) am PMV gelagerten Dokumenten gemessen. Die Papiere mit Schrift werden nur gemäß ISO 20494 vor und nach 12 Tagen Alterung getestet.
3. Korrekturflüssigkeit: Diese ist heutzutage noch erhältlich, wird jedoch nur gemäß ISO 20494 vor und nach 12 Tagen Alterung getestet. Zudem wird sich die Prüfung nur auf die optischen Eigenschaften beschränken.
4. Farbiges, holzhaltiges Papier: Hierbei handelt es sich um einen Sonderfall, der jedoch gut in die Aufgabenstellung passt. Der Autor dieses Berichtes war früher beim Papierhersteller Steinbeis Papier in Gemmrigheim beschäftigt. Dort wurden holzhaltige farbige Papiere aus Recyclingfasern mit nicht lichtechten Farben hergestellt. Zu privaten Zwecken lagerte eine Rolle rotes Papier, mindestens 20 Jahre alt, nicht sachgerecht in Garagen oder im Keller und hat mehrere Umzüge durchlaufen. Dieses Papier erfüllt

außer der Alkalireserve und der Neutralleimung keine der für alterungsbeständige Papiere gültigen Empfehlungen. Die Untersuchung dieses Papiers verspricht Aufschluss über die zu erwartenden Schäden.

4.3 Messparameter und Zeithorizonte für beschleunigte Alterung

Die Leistungsbeschreibung verlangt, dass bei den Messungen bereits existierende Alterungsverfahren berücksichtigt werden sollen. Hieraus ergeben sich grundsätzlich als Alterungszeiten die von den verschiedenen Normen oder Vorschriften vorgesehenen Tage (siehe hierzu den Vergleich der Normen in Tabelle 1). Diese weichen untereinander z. T. leicht ab. Zur Orientierung wird daher auf die DIN 6738 zurückgegriffen, die eine Alterung von 6, 12 und 24 Tagen vorsieht. Das Ziel dieser Norm ist es, eine Aussage über die Lebensdauer eines Papiers zu treffen, die sich mit vertretbarem zeitlichen und Messaufwand finden lässt. Im vorliegenden Projekt soll darüber hinaus untersucht werden, ob sich bei längerer künstlicher Alterung Effekte einstellen, die bei der Auswahl von Papieren berücksichtigt werden müssen. Darum sieht die Leistungsbeschreibung bereits monatliche Untersuchungen über eine Zeitdauer von 16 Monaten vor.

In Summe ergeben sich dadurch potenzielle Messpunkte zu Beginn (ungealtert), nach 6, 12 und 24 Tagen, 16-mal monatlich sowie eine Kontrollmessung am Ende am natürlich gealterten Papier. Eine komplette Probereihe bestünde somit aus 21 Messpunkten. Da an jeder Probe nicht nur ein, sondern viele Parameter gemessen werden sollen, würde dies bei den vielen Varianten an Papieren und Drucken eine Probenanzahl bedeuten, die logistisch nicht zu bewältigen wäre. Daher ist zusammen mit dem BASE eine Matrix erstellt worden, welche Papiere durchgängig an allen 21 Messpunkten vermessen werden und welche nur an ausgewählten Messpunkten. Hinzu kommt, dass nicht nur in den etablierten Klimata der DIN 6738 (bzw. ISO 5630-3, ISO 20494 und NEN 2728) und der ISO 5630-5 gealtert wird, sondern auch bei 4 °C im Kühlschrank, wodurch sich die Messreihe verdreifachen würde. Des Weiteren kommen die Kombinationen hinzu (wie im Kapitel 4.2.1 erläutert), da die Laborpapiere verpackt und offen sowie miteinander und einzeln gelagert werden.

Aus diesem Grunde werden nicht alle Papiere zu allen genannten Zeitpunkten vermessen. Stattdessen beschränkt sich die Vermessung an allen Punkten auf das Laborpapier aus NBSK, auf das unbedruckte Industriekopierpapier (in Aluminiumfolie verpackt), welches die ISO 9706 erfüllt sowie das gleiche Papier mit Trockentoner bedruckt (in Aluminiumfolie verpackt). Die anderen Papiere werden zu Zeiten und Bedingungen gealtert, wie sich bei der Aufzählung der Papiere schon miterwähnt wurden (siehe Kapitel 4.2). Für den Fall, dass sich im zeitlichen Verlauf der Alterung Änderungen ergeben hätten, die eine zeitliche engere Un-

tersuchung an bestimmten Stellen interessant erscheinen ließen, sind für verschiedene Substrate Reserveproben mitgealtert worden, insgesamt 41. Diese hätte man bei Bedarf zusätzlich messen können, was sich im Laufe des Projektes aber als nicht nötig herausgestellt hat.

Insgesamt werden durch die Auswahl an Substraten, Klimata und zeitlichen Alterungen 394 Messpunkte angefahren, womit abzüglich der Reserveproben 353 verschiedene Punkte erfasst wurden. Jeder Messpunkt hat eine Proben-ID mit dreistelliger Nummer, von 001 bis 394. Aus einer Proben-ID-Liste ist erkennbar, was jeder Punkt bedeutet. 001 z. B. ist NBSK ungealtert, d. h. hierunter verbergen sich die Laborblätter aus Langfaserzellstoff, die für die Messungen im ungealterten Zustand vorgesehen sind. Zugeordnet zur Proben-ID finden sich in der Liste, die dem BASE zur Verfügung gestellt wird, auch noch die Nummern der einzelnen Laborblätter. Verschiedenen Messungen von und nach der Alterung können so auf der Ebene des einzelnen Laborblattes miteinander verglichen werden. Die an diesen Messpunkten gemessenen Parameter werden im Folgenden erläutert. Für einen Messwert werden im Allgemeinen 10 Messungen (bzw. die nach der Messvorschrift oder Norm geforderte Anzahl) durchgeführt, daraus werden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Um für alle Messpunkte genügend Probenmaterial für die vorgesehenen Messungen zu haben, mussten insgesamt ca. 11.000 Einzelproben erzeugt, eingelagert und vermessen werden. Das entspricht etwas mehr als einem laufenden Meter Akten bzw. 22 Paketen Kopierpapier. Zur Veranschaulichung ist dies in Abbildung 11 dargestellt.

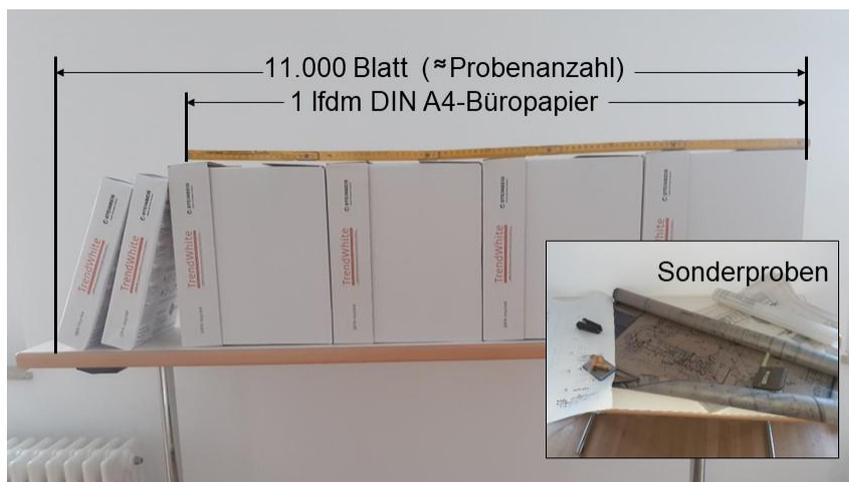


Abbildung 11 Veranschaulichung Probenumfang (Quelle: Dr. Heinz Joachim Schaffrath)

Die Proben werden gealtert und dann auf verschiedene Weise vermessen. Einen Eindruck hierzu vermittelt Abbildung 12:



Abbildung 12 Beispiele verwendeter Geräte (Quelle: Dr. Heinz Joachim Schaffrath)

4.3.1 Physikalische Messparameter

Des Öfteren wurde in den vorigen Kapiteln auf die große Relevanz der mechanischen und optischen Eigenschaften eingegangen. Die Auswahl der Parameter, die für die Untersuchung ausgewählt werden, richtet sich nach den in den Normen zur Bewertung der künstlichen Papieralterung teilweise vorgeschriebenen Messverfahren (z. B. Doppelfalz widerstand, Bruchkraft, Bruchdehnung, Durchreißwiderstand; siehe hierzu auch Tabelle 1).

Zusätzlich werden Messverfahren aufgenommen, die in der Literaturrecherche Erwähnung finden, weil man sich erhofft, damit den Abbaugrad der Cellulose schon mechanisch gut erfassen zu können (z. B. die Nullreißlänge, auch Zero Span genannt). Des Weiteren werden Parameter mit aufgenommen, die sich im Zuge der Messung automatisch mit ergeben (z. B. das Arbeitsaufnahmevermögen beim Zugversuch, welches zusätzlich zur Bruchkraft und Bruchdehnung Aussagen zur Sprödigkeit der Papierprobe liefern kann).

Bei der Optik wird auf genormte Messverfahren und Messwerte zurückgegriffen, die für die jeweilige Anwendung typisch sind. Dies bedeutet, dass die am Papier gemessenen Werte mit diffusem Licht und mit der Normlichtart D65/10° mit und ohne UV-Anteil gemessen werden. Das verwendete Messgerät (Color Touch, Messöffnung 28 mm Durchmesser) arbeitet mit einer Ulbrichtschen Kugel und einer Glanzfalle, was sicherstellt, dass nur diffuses Licht gemessen wird. Diese Messweise ist bei Papier üblich und in der Literatur weit verbreitet. Die erhaltenen Messergebnisse lassen sich so in andere Arbeiten einordnen.

An den bedruckten Papieren hingegen werden die Farbwerte mit einem handelsüblichen Densitometer (Techkon SpectroDens Premium), Normlichtart D50/2° und Messgeometrie 0/45 (d. h. Lichteinfall unter 0° direkt von oben und Messung zirkular unter 45°) bestimmt. Dieses

Verfahren wiederum ist in der Druckindustrie an fertigen Drucken üblich. Die Farbwerte können mit diesem Verfahren auch auf kleinen Flächen gemessen werden (3 mm Durchmesser). Die Ergebnisse dienen der Beurteilung der Lesbarkeit von Informationen.

Zusätzlich wird an den Proben der fasermorphologische Zustand gemessen. Hierzu dient ein Faserlängenmessgerät FS5 der Firma Valmet. Für die Messung wird eine Faserprobe in Wasser dispergiert und bei geringer Konzentration zwischen zwei Glasplatten durchgeleitet. Eine Kamera nimmt die Fasern auf. Die Bilder werden ausgewertet und liefern Angaben zur Faserbreite, Faserlänge und zum Fibrillierungsgrad. Änderungen der gemessenen Parameter weisen auf eine Änderung der Fasern infolge des Alterungsprozesses hin. Diese Messung wurde bisher in der Literatur nicht erwähnt und ist daher geeignet, eventuell neue Erkenntnisse zum Alterungsprozess der Papierfasern zu gewinnen.

Im Einzelnen werden folgende Parameter erfasst:

1. Grundeigenschaften der Papiere:

- Flächenbezogene Masse – Masse des Papiers in g pro m²
- Dicke
- Feuchteanteil – bei 105 °C flüchtige Anteile
- Gehalt an anorganischen Bestandteilen, insbesondere Calciumcarbonat als Alkalireserve – zerstörungsfrei gemessen mit dem Röntgenfluoreszenzgerät ACA der Firma Emtec

2. Mechanische Eigenschaften; bei den Industripapieren erfolgt die Bestimmung in Längs- (MD) und Querrichtung (CD):

- Durchreißwiderstand – eine Papierprobe wird definiert durch einen Messerschnitt geschädigt und danach durchgerissen; die dafür benötigte Energie wird gemessen; der Messwert wird in fast allen Normen mit Aussagen zur Beständigkeit von Papier gefordert (siehe Tabelle 1)
- Dauerbiegewiderstand – ein Papierstreifen wird in einem Gerät unter definierten Bedingungen so lange hin- und her gefaltet, bis er reißt; die Anzahl wird logarithmiert und als Dauerbiegewiderstand angegeben; durch die Logarithmierung kann sich ein negativer Falzwiderstand ergeben, wenn nämlich die Anzahl der Falzungen bis zum Reißen im Durchschnitt < 1 ist; der Messwert wird in den Normen ISO 11108, NEN 2728, ISO 5630-5 und ISO 16245 gefordert
- Nullreißlänge – ein Papierstreifen wird über eine Länge von 0,7 mm eingespannt und dann zerrissen; da die Fasern üblicherweise eine Länge von 1 mm und länger haben, wird so vor allem die Faserfestigkeit getestet, nicht die des Blattgefüges

- breitenbezogene Bruchkraft (und daraus errechnet die Reißlänge) – ein Papiersteifen wird über eine Länge von 100 mm eingespannt und zerrissen; dadurch wird vor allem die Gefügefestigkeit getestet; der Wert wird in den Normen UNI 10332 und DIN 6738 gefordert
- Bruchdehnung – bei der Messung der Bruchkraft wird das Papier infolge der eingeleiteten Kraft gedehnt; die Dehnung im Moment des Zerreißens der Proben wird als Messwert notiert; in der DIN 6738 dient der Wert in als Aussage für die Sprödigkeit bzw. Restelastizität des Papiers
- Arbeitsaufnahmevermögen – beim Zugversuch wird Kraft in das Papier geleitet, dadurch dehnt es sich und nimmt Arbeit auf; die Arbeit wird bis zum Bruch aufintegriert und bildet so den Messwert; anschaulich ist es die Fläche unter der Kraft-Dehnungskurve; verläuft die Kurve zwischen dem Nullpunkt beim Start des Versuchs und dem Bruchpunkt anders, schlägt sich dies im Messwert nieder, obwohl Bruchkraft und Bruchdehnung gleich sein können
- E-Modul – dieser ergibt sich als Anfangssteigung der Kraft-Dehnungskurve im Zugversuch; es handelt sich um einen allgemein bei Materialien verwendeten Kennwert, der etwas über die Steifigkeit aussagt

3. Optische Eigenschaften

- Weißgrad R_{457} bei Normlichtart D65/10°, mit und ohne UV – dieser Wert gibt die Reflexion des Lichtes bei einer Schwerpunktwellenlänge von 457 nm (d. h. im leicht blauen Bereich) verglichen mit dem Wert eines ideal weißen Standards an. 100 % bedeutet, genauso Weiß wie der Standard. Werte von über 100 % sind möglich, da durch optischen Aufheller unsichtbares UV-Licht in sichtbares Licht genau im gemessenen Wellenlängenbereich umgeformt wird. Dadurch wird bei 457 nm mehr Licht reflektiert, als von der Lichtquelle eingestrahlt wird (nur, wenn mit UV-Anteil gemessen wird). Die Differenz der Messwerte mit und ohne UV ist ein Maß für die Menge an optischem Aufheller im Papier.
- CIE-Farbart L^* , a^* und b^* bei Normlichtart D65/10° mit UV – diese Werte werden im gleichen Messvorgang wie der Weißgrad R_{457} gemessen. Es handelt sich um die Farbmaßzahlen L^* (Helligkeit), a^* (Rot-Grün-Wert) und b^* (Gelb-Blau-Wert) im CIE-Farbraum. Dieser ist an das durchschnittliche Farbempfinden des Menschen angepasst. Die drei Farbmaßzahlen bilden einen Vektor, der einen Punkt im Farbraum beschreibt. Gleiche vektorielle Abstände von unterschiedlichen Farben werden vom Menschen als gleich unterschiedlich empfunden. Hat der Abstandsvektor einen Betrag von ≤ 1 , so kann ein normalsichtiger Mensch keinen Unterschied zwischen zwei Farben erkennen, obwohl er sich noch messen lässt.

- Opazität – dies ist ein Maß für die Undurchsichtigkeit des Papiers. Fällt Licht auf ein Papier, kann es absorbiert oder gestreut werden. Beides erhöht die Opazität.
- Absorptionskoeffizient k – aus der Messung der Opazität kann mithilfe der Theorie von Kubelka-Munk der Anteil errechnet werden, der an einfallendem Licht absorbiert wird. Werden die Papierfasern dunkler, wird mehr Licht absorbiert, k steigt.
- Streukoeffizient s – auch dieser Wert kann aus der Opazitätsmessung mithilfe der Kubelka-Munk-Theorie errechnet werden. Steigt die Anzahl von Grenzflächen, so steigt auch das Streuvermögen, s steigt, das Papier erscheint weißer. Dies ist z. B. der Effekt, den man an weißem Bierschaum beobachtet, obwohl das Getränk selbst bernsteinfarben ist
- CIE- $L^*a^*b^*$ bei Normlichtart D50/2° mit UV, Messgeometrie 0/45 – diese Werte werden an den bedruckten Stellen der Industripapiere gemessen. L^* , a^* und b^* entsprechen zwar wieder dem Farbvektor im CIE-Farbraum. Da aber die Lichtart und die Messgeometrie anders als beim oben bereits erwähnten CIE-Farbart am unbedruckten Papier festgelegt sind, können die Farbvektoren nicht direkt miteinander verglichen werden. Die Messung ist, wie schon erwähnt, in der Druckindustrie üblich und erlaubt Aussagen an Farbdrucken. Gemessen werden $L^*a^*b^*$ sowohl an unbedruckten Stellen im Blatt als auch jeweils in der bedruckten Volltonflächen Cyan (C), Magenta (M), Yellow (Y) und Kontrast (K = Schwarz). Angegeben sind Absolutwerte. Man kann aus den Werten herauslesen, ob sich die Farben durch Alterung verändert haben und auch, ob sich das Blatt an den unbedruckten Stellen verändert hat. Z. B könnte sich eine Farbe im Druck ändern, was aber nicht an der Druckfarbe liegt, sondern am Bedruckstoff, der sich geändert hat.
- CMYK plus D bei Normlichtart A/10° – die Abkürzungen stehen für Cyan, Magenta, Yellow und Kontrast sowie „Density“ (Farbdichte). Angegeben sind Relativwerte zu unbedruckten Stellen im Blatt. Die Messung am Blatt wird extra ausgegeben. Der Wert der Farbdichte sagt etwas darüber aus, wie stark oder blass die gemessene Farbe vorhanden ist. Die Messung dient während des Probedrucks dazu festzustellen, ob der Farbauftrag ausreichend ist. Dies stellt das Druckpersonal anhand von Normen für farbverbindliche Drucke fest (ISO 12647-1 bis -8).

4. Fasermorphologische Eigenschaften

- Angegeben sind Werte zur Fasermorphologie nach ISO 16065-2 „Pulps - Determination of fibre length by automated optical analysis“. Es handelt sich um Faserlängen (unterschiedlich gewichtet), Faserbreite, Feinstoffe, Faserklassen, Angaben zur Faserkrümmung, zur Faserfibrillierung und zur Coarseness (einer längenbezogenen Faser-masse).

4.3.2 Chemische Messparameter

Aus der Literaturrecherche ergeben sich einige chemische Parameter von Relevanz zur Beurteilung der Alterungsresistenz. Manche Messungen, vor allem die Bestimmung des Depolymerisationsgrades, sind sehr aufwendig und entweder zeitlich oder von der Geräteausstattung des PMV her nicht im Rahmen des Projektes Labest Papier durchführbar. Allerdings sind diese Messungen auch nicht zwingend nötig, um qualifizierte Aussagen über die Alterungsbeständigkeit von Papier treffen zu können. Ein Abbau der Celluloseketten macht sich auch in den mechanischen Eigenschaften bemerkbar. Dies erfolgt zudem in der Ausprägung, in der es praktische Relevanz hat, weil die konkreten mechanischen Parameter mit den Handhabungsanforderungen abgeglichen werden können.

Die Vorgaben der Normen für alterungsbeständige Papiere hinsichtlich chemischer Parameter werden jedoch mitgemessen. Im Einzelnen sind dies:

1. Die Kappa-Zahl – wie schon mehrfach im vorliegenden Bericht ausgeführt, handelt es sich um eine chemische Messmethode, die den Gehalt an oxidierbaren Stoffen in einem Fasergemisch ermittelt. Das Messergebnis wird wesentlich durch den Gehalt an Lignin bestimmt, allerdings nicht ausschließlich. In einigen Normen wird die Kappazahl als Maßzahl für das Oxidationspotential bezeichnet und limitiert. Eine Veränderung über einen Alterungsprozess zeigt an, ob das Potential an oxidierbaren und damit eventuell die Alterung begünstigenden Stoffen zunimmt.
2. Der pH-Wert im Kaltwasserextrakt – dieser Summenparameter erlaubt eine Aussage über Alterungsvorgänge, da beim Abbau der Cellulose Säuren entstehen und der pH-Wert dadurch tendenziell abnimmt. Allerdings spielen auch gegenläufige Effekte eine Rolle, da durch die für alterungsbeständige Papiere vorgeschriebene Alkalireserve die Abbauprodukte abgepuffert werden.
3. Die Alkalireserve – sollten noch keine gravierenden Änderungen des pH-Wertes gemessen werden, so kann eine Abnahme der Alkalireserve darüber Aufschluss geben, dass im Papier eingebundenes Calciumcarbonat als „Bremse“ gegen die Alterung verbraucht worden ist. Verschiedene Normen schreiben eine Mindestalkalireserve für alterungsbeständige Papiere vor. Diese sollte auch nach den künstlichen Alterungsprozessen noch erhalten sein, um ein Papier als alterungsbeständig empfehlen zu können.
4. VOC (volatile organic compounds = flüchtige organische Inhaltsstoffe) – diese Messung gibt einen Summenparameter aus. Die flüchtigen Stoffe können aus Papieradditiven stammen oder aus durch Alterung entstandenen Abbauprodukten der Cellulose bzw. des Lignins, bei bedruckten Proben spielen die Druckfarbenbestandteile oft eine entscheidende Rolle. Tendenziell sind die VOC unerwünscht, da sie Autooxidationsvorgänge begünstigen können, wenn auch nicht müssen. Gemessen werden die VOC im Projekt Labest Papier

gemäß der Thermodesorptions-Methode im Anhang 4 der RAL-UZ 14 „Recyclingpapier“, Ausgabe Januar 2014, die zur Erfüllung der Kriterien für den Blauen Engel definiert wurde (RAL-UZ 14 Anhang 4). Detaillierte Angaben zur Durchführung und Auswertung der VOC-Messungen sind im 4.4.4.2 enthalten. Mittlerweile ist die Messung der VOC auch Gegenstand der Norm DIN ISO 23404, Ausgabe Februar 2022, geworden (DIN ISO 23404:2022-02). Die dort beschriebene Methode hat aber den Zweck, Emissionen von Stoffen zu bewerten, die mit Archivgut in Kontakt kommen, also beispielsweise aus Schachteln, Kisten, Akten entweichen und auf das archivierte Papier einwirken können. Die Zielstellung im Projekt Labest Papier ist jedoch, das Emissionspotential der gealterten Papiere selbst zu bewerten, nicht das Emissionspotenzial ihrer Verpackungen.

4.4 Auswertung der Testreihen und begründete Empfehlungen

Die große Anzahl an erhobenen Daten erlaubt es nicht, alle im vorliegenden Bericht wiederzugeben. Daher beschränkt sich die Darstellung auf solche Daten, die zielführend für die beabsichtigte Empfehlung einer Papier – Schreib-/Druckstoff-Variante sind und/oder die besondere Erkenntnisse im Verlaufe des Projektes offenbart haben. Alle Daten werden dem BASE als Excel-Files mit den zugehörigen Informationen zu den Proben und den durchgeführten Messungen zur Verfügung gestellt. Das Datenmaterial ließe sich noch unter weiteren Gesichtspunkten auswerten, was aber nicht Teil der Leistungsbeschreibung ist und den Rahmen des Projektes sprengen würde. Bei der Auswertung der Testreihen werden arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen betrachtet. Zudem werden die Mittelwerte normiert, um Papiere, die z. B. ein unterschiedliches Festigkeitsniveau haben, direkt miteinander vergleichen zu können.

4.4.1 Auswertung der Festigkeitsveränderungen durch künstliche Alterung

Wie oben beschrieben unterteilen sich die Proben in Laborpapiere, unbedruckte Industripapiere, bedruckte Industripapiere und Sonderpapiere.

Laborpapiere

Zunächst seien die Laborblätter aus Lintersfasern betrachtet. Von diesen wird gemäß der Literaturrecherche erwartet, dass sie am wenigsten altern. Um Messwerte verschiedener Skalierungen in einem Diagramm darstellen zu können, werden sie normiert. Der Wert, der zu Beginn der Versuche am ungealterten Papier vorliegt, wird zu 100 % gesetzt. Zudem werden die Festigkeitswerte aus den Versuchen mit den tatsächlich vorliegenden flächenbezogenen Massen der Papiere sowie deren Füllstoffgehalt korrigiert. Dadurch wird vermieden, dass Schwankungen in den besagten Werten Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften durch Alterung vortäuschen, die eigentlich nicht vorhanden sind. Bei der Luftdurchlässigkeit

macht dies keinen Sinn, darum wird hier darauf verzichtet. Die gemessenen Festigkeitswerte sind auf Abbildung 13 und Abbildung 14 verteilt. Die Reißlänge wird nicht dargestellt, da deren Verlauf mit der der Bruchkraft identisch ist.

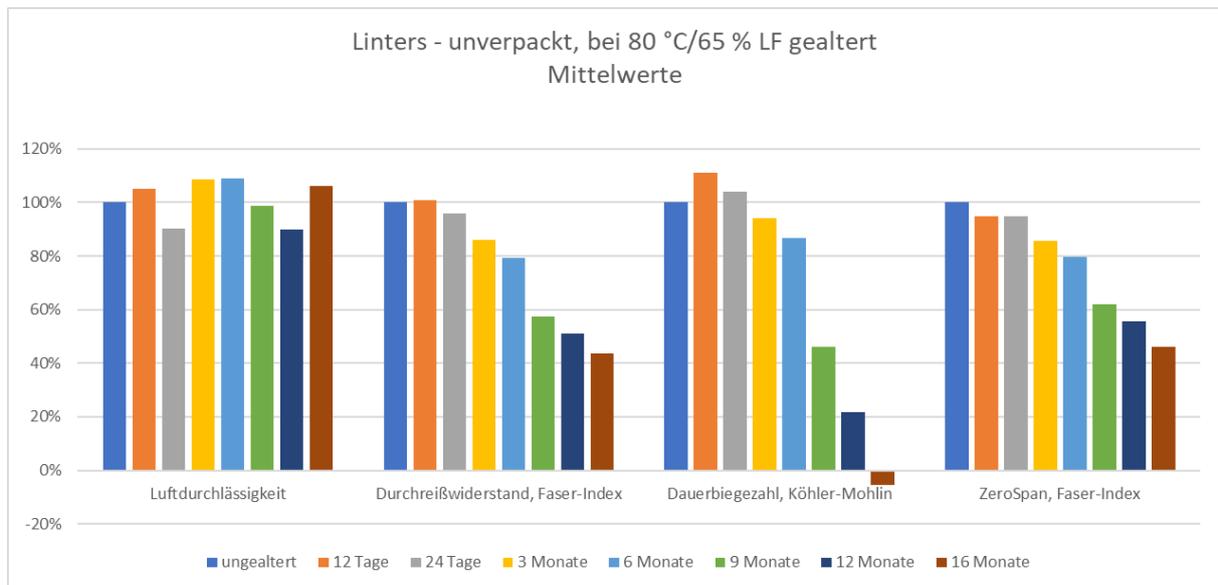


Abbildung 13 Linters – Verlauf mech. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung Teil 1

Die Luftdurchlässigkeit zeigte keine Tendenz, sich durch Alterung zu verändern. Man sieht, dass die mechanischen Werte, bis auf den E-Modul, zunächst leicht ansteigen und dann abfallen. Da der Anstieg bis zu einer künstlichen Alterung über 24 Tage erfolgt und der Abfall erst danach, ist festzuhalten, dass der nach DIN 6738 festgelegte Zeitraum von maximal 24 Tagen künstlicher Alterung kritisch hinterfragt werden muss. Offensichtlich ist diese Zeit zu kurz und offenbart noch nicht die eintretenden Veränderungen.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die mechanischen Eigenschaften der Linterslaborpapiere um teilweise mehr als 50 % zurückgehen. Ob diese Veränderung durch die Tatsache hervorgerufen wird, dass hier unverpackte Blätter getestet wurden (d. h. eventuell im Klimaschrank vorhandene schädliche Substanzen könnten den Abfall provoziert haben) oder ob die lange Lagerung bei dem ungewöhnlichen Alterungsklima Effekte hervorgerufen hat, die so normalerweise nicht eintreten würden, ist noch anhand später dargestellter Messungen zu untersuchen.

Der Extremfall ist der Dauerbiegewiderstand, der sogar unter 0 % sinkt, die Festigkeit also „negativ“ wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieser Wert als Logarithmus aus der Anzahl an Falzungen gebildet wird, die bis zum Bruch auftreten. Sofern der Mittelwert der Anzahl an Falzungen < 1 wird, ist der Logarithmus negativ. D. h. es gibt eine Reihe von Proben, die keine einzige Faltung aushalten und während der ersten Faltung schon reißen. Andere halten eine oder wenige Faltungen aus, bevor sie reißen. Der Durchschnitt beträgt weniger als eine Faltung bis zum Riss.

Hierzu ist anzumerken, dass die Faltung im Test nach Norm unter verschärften Bedingungen stattfindet, d. h. unter definierter Zugbelastung. Eine Anzahl von einer Falzung im Gerät bis zum Bruch, die einen Falzwiderstand von 0 bedeutet, heißt nicht, dass man das Blatt unter „normalen“ Umständen nicht mehrmals falten kann.

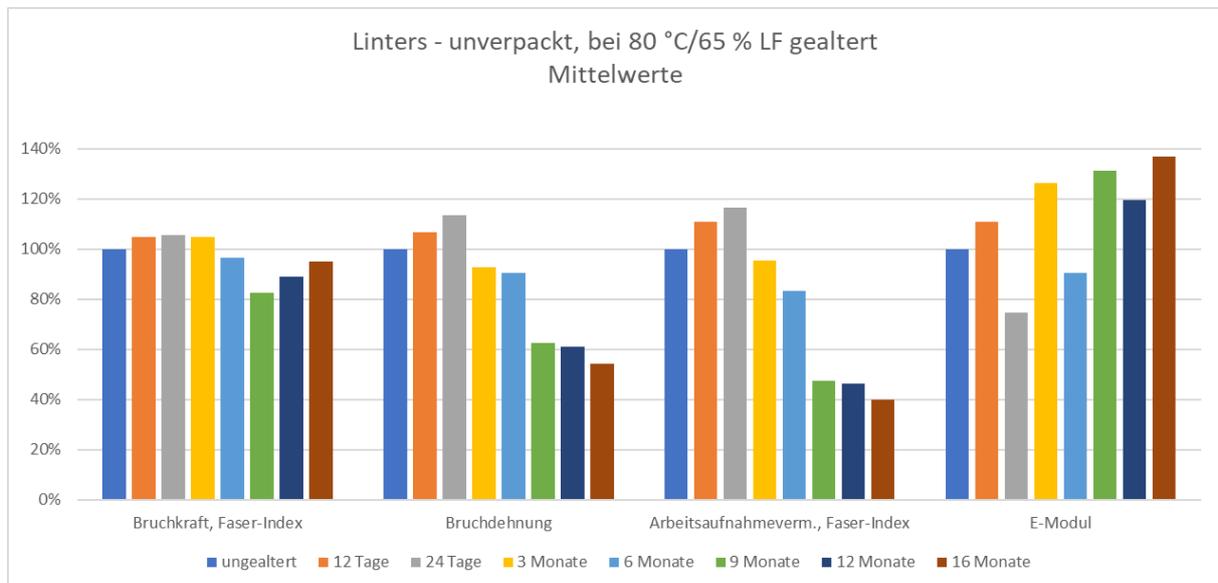


Abbildung 14 Linters – Verlauf mech. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung Teil 2

Der E-Modul stellt in diesem Zusammenhang eine auffällige Größe dar, die keine einheitliche Tendenz zeigt. Er schwankt stark und scheint kein geeigneter Indikator für Alterungserscheinungen zu sein. Das Arbeitsaufnahmevermögen, welches sich aus dem Kraft-Dehnungsverlauf bis zum Zerreißen einer Probe errechnet, stellt die bei Bruchkraft und Bruchdehnung sichtbaren Verläufe hingegen gut zusammengefasst dar. Da der E-Modul laut Definition die Steigung der Kraft-Dehnungskurve zu Beginn der Belastung darstellt, beinhaltet das Arbeitsaufnahmevermögen drei der in Abbildung 14 dargestellten Werte – den E-Modul, die Bruchkraft und die Bruchdehnung. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur noch das Arbeitsaufnahmevermögen dargestellt und die drei anderen Parameter nicht mehr. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die Daten vorliegen und bei Bedarf für weitere Untersuchungen herangezogen werden können. Des Weiteren sei darauf verwiesen, dass auch die (DIN ISO 11798) das Arbeitsaufnahmevermögen als charakteristische Größe heranzieht, welche durch ein Druckverfahren maximal um 10 % gesenkt werden darf.

Die folgende Abbildung 15 zeigt, welchen Einfluss die Art der Lagerung während der Alterung hat. Deutlich ist zu erkennen, dass eine Lagerung gekühlt bei 4 °C keine Veränderung der Festigkeitseigenschaften zeigt. Eine Ausnahme ist das Arbeitsaufnahmevermögen. Der Anstieg durch die gekühlte Lagerung deutet an, dass das Linterslaborpapier an Flexibilität gewonnen hat.

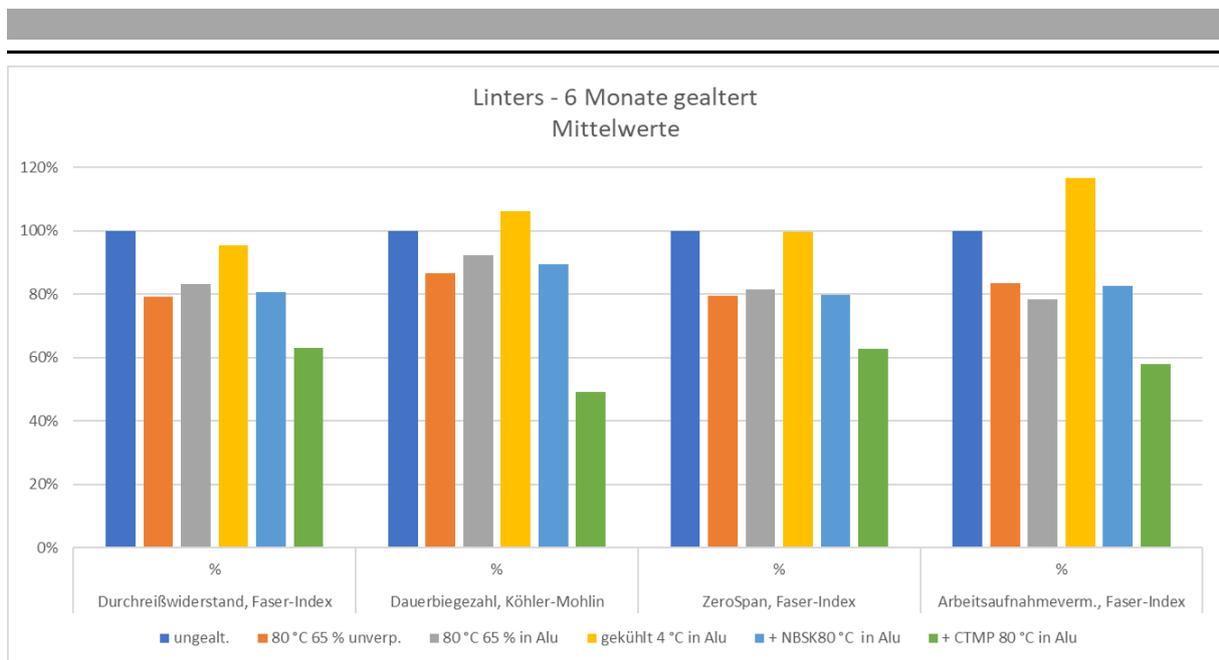


Abbildung 15 Linters – in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert

Hingegen ist ebenfalls klar zu erkennen, dass die gemeinsame Lagerung von Linters und ligninhaltigen CTMP-Blättern in Alufolie zu einem Festigkeitsabbau bei Linters führen. Dieses Ergebnis zeigt sich zusätzlich, wenn auch nicht so ausgeprägt, im Vergleich unverpackt und in Alufolie verpackt. Verpackt büßt Linters weniger an Festigkeit ein als unverpackt. Außerdem zeigen sich keine signifikanten Abweichungen der Einbußen in den Eigenschaften, wenn Linters mit gebleichtem Zellstoff (NBSK) zusammen gelagert wird. Damit bestätigt sich, dass das Augenmerk, welches z. B. die Norm ISO 16245 darauf legt, dass Archivpapiere nicht mit holzhaltigen Papieren in Kontakt kommen dürfen, berechtigt ist. Es findet eine Kreuzkontamination statt, die tendenziell als alterungsbeständig eingestufte Fasern schädigen kann. Diese Aussagen werden unterstrichen, wenn man sich das Bild am Ende der Alterung noch 16 Monaten ansieht.

In Abbildung 16 sind auch die Laborblattvarianten enthalten, die im Klimaraum, also bei den gleichmäßigen Normbedingungen des Prüfklimas von 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte, gelagert wurde. Dadurch ist ein Vergleich möglich, wie sich der Zustand während der Versuchslaufzeit trotz guter Lagerbedingungen verändert (natürliche Alterung). Man sieht, dass die Balken der Lagerung bei Prüfklima in etwa mit den Werten bei Lagerung im Kühlraum übereinstimmen. Eine Ausnahme ist die Nullreißlänge (ZeroSpan). Hier wirkt sich offenbar aus, ob das Linterslaborpapier unverpackt oder mit anderen Fasern zusammen gelagert wurde, denn es ist bei diesem Parameter ein Verlust an Festigkeit festzustellen. Mit den Werten der bei 80 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gealterten Laborpapiere zeigt dies unverkennbar, dass mit Linters zusammen gelagerte ligninhaltige Produkte das Alterungsverhalten der Lintersfasern beeinflussen. Die Lagerung zusammen mit ligninfreien Fasern (hier mit NBSK) stellt sich nur bei der Nullreißlänge als nicht unkritisch dar.

Zudem ragt wiederum der Dauerbiegewiderstand heraus. Nicht nur die Werte der gekühlten Proben (wie bei der Alterung nach 6 Monaten), sondern auch alle im Prüfklima gelagerten Proben zeigen einen um ca. 25 % höheren Wert als das Papier zu Beginn der Versuchslaufzeit. Nicht ganz so ausgeprägt ist die Tendenz beim Arbeitsaufnahmevermögen. Die schon bei der Alterung nach 6 Monaten in Erwägung gezogene Möglichkeit, dass Papier durch Lagerung an Flexibilität gewinnen kann, bestätigt sich hier. Diese Hypothese ist neu und bisher in der Literatur noch nicht zu finden.

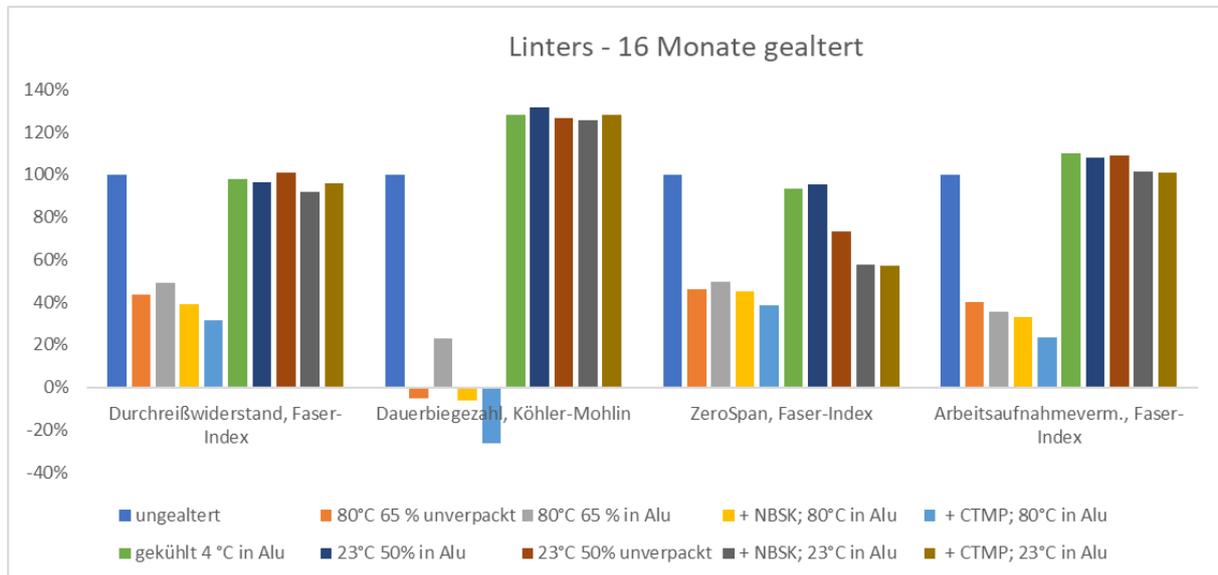


Abbildung 16 Linters – in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert

Als nächstes seien die Laborblätter aus dem komplementären Material, d. h. aus CTMP, betrachtet. CTMP ist laut verschiedenen Normen wegen seines Ligningehalts nicht für alterungsbeständige Dokumente geeignet. Die Darstellung wiederholt die bei den Linterspapieren gewählte Reihenfolge. Zunächst wird der unverpackte CTMP gezeigt. Die Festigkeiten verteilen sich auf Abbildung 17 und Abbildung 18.

Die bei Linters gefundenen Aussage kann auch hier getroffen werden. Ein Alterungszeitraum von 24 Tagen führen zu Steigerungen in den Festigkeitswerten. Ein spürbarer Abfall tritt erst danach ein. Besonders dramatisch zeigt sich dies in der Dauerbiegezahl, die bei 9 Monaten auf Null absinkt und danach nicht mehr messbar ist. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Wert aus dem dekadischen Logarithmus der Anzahl der gemessenen Falzungen bis zum Bruch berechnet wird. Ein Wert von Null bedeutet daher, dass das Papier im Schnitt eine Falzung bis zum Bruch ausgehalten hat. Dafür steigt die Dauerbiegezahl in der den ersten 24 Tagen der Alterung sogar stark an. Zusammen mit dem Verlauf des Arbeitsaufnahmevermögens deutet dies auf eine zunächst ansteigende Flexibilität des Blattes hin, wie ebenfalls bei Linters beobachtet.

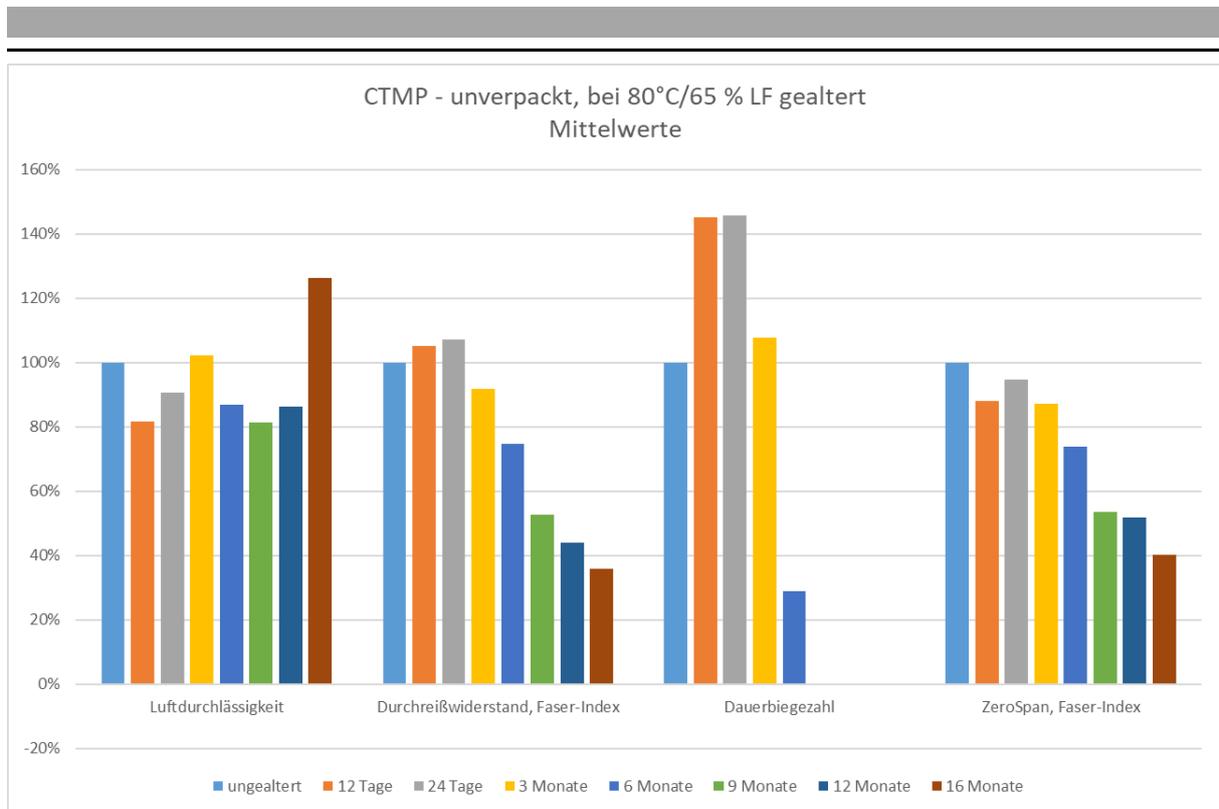


Abbildung 17 CTMP – Verlauf der Festigkeiten 0 – 16 Monate Alterung Teil 1

Wiederum ist unklar, ob der ab dem 3. Monat der Alterung zu erkennende stetige Abfall der mechanischen Eigenschaften durch Prozesse ausgelöst wurde, die nur bei höheren Temperaturen und/oder Luftfeuchten ausgelöst werden, nicht aber bei niedrigeren. Die Luftdurchlässigkeit zeigt keine einheitliche Tendenz. Dies deckt sich mit der Beobachtung bei Linters. Eine Alterungserscheinung ist an diesem Wert nicht festzustellen. Nullreißlänge (ZeroSpan) und Durchreißwiderstand zeigen eine fallende Tendenz, wobei der Durchreißwiderstand ebenfalls den Anstieg wiedergibt, der bei der Dauerbiegezahl beobachtet werden kann.

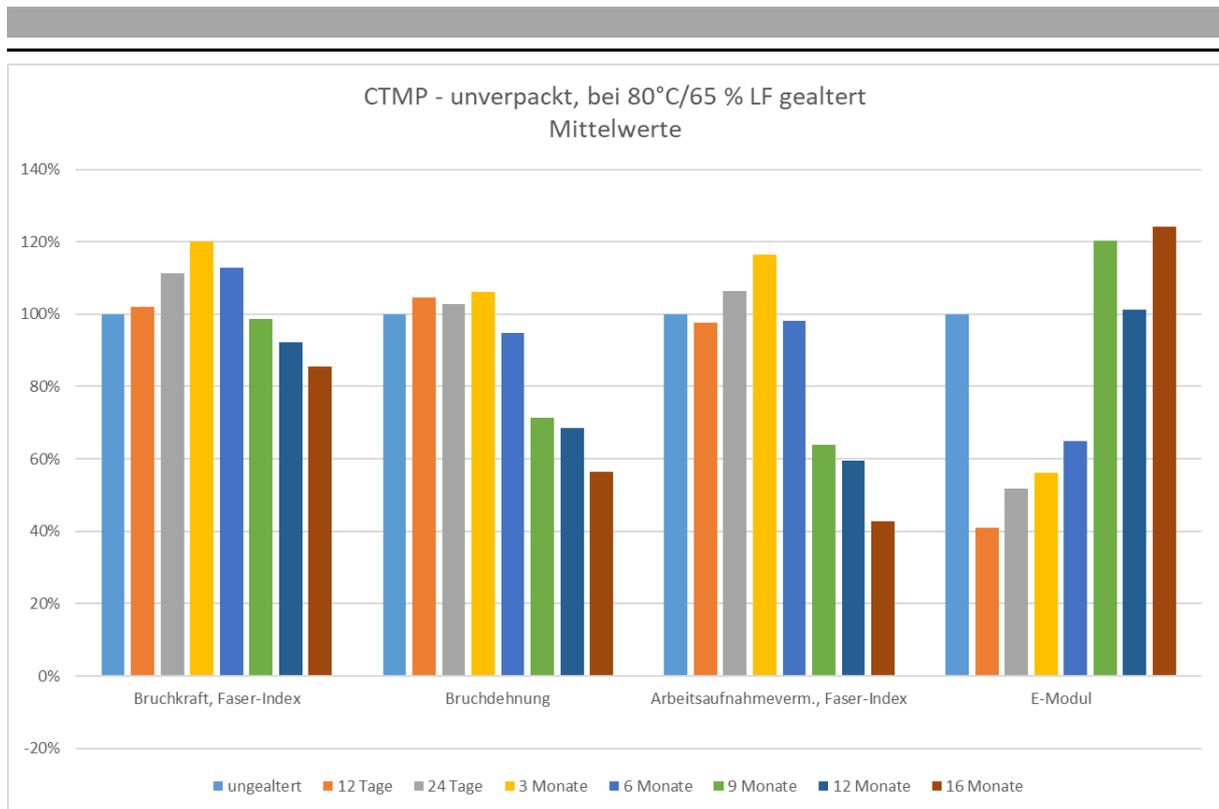


Abbildung 18 CTMP – Verlauf der Festigkeiten 0 – 16 Monate Alterung Teil 2

Der E-Modul erweist sich bei CTMP ebenfalls als ungeeigneter Parameter für die Indikation einer Alterung. Zuerst ein Abfall, dann tendenziell ein Anstieg – dies ist auf die Bestimmungsweise zurückzuführen, da der E-Modul die Tangente am Beginn der Kraft-Dehnungskurve des Zugversuchs ist. Dies sagt noch nichts über den Gesamtverlauf der Kurve aus. Das Arbeitsaufnahmevermögen ist dafür wieder der Summenparameter, der Bruchkraft, Bruchdehnung und E-Modul abdecken kann. In ihm wird auch der Kraft-Dehnungskurvenverlauf während des Zugversuchs repräsentativ abgebildet.

Der Blick auf den Status nach 6 Monaten Alterung (Abbildung 19) zeigt wiederum, dass die Kühlung keinen senkenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Ob CTMP allein verpackt, unverpackt oder mit anderen Faserstoffen zusammen in Alufolie verpackt gealtert wurde, hat keinen signifikanten Einfluss. Dies wäre zu erwarten, weil die alterungsresistenten Faserstoffe durch CTMP selbst in der Alterung angeregt werden und so autooxidative Prozesse auslösen, nicht sie bremsen, wird aber nach 16 Monaten Alterung nicht bestätigt (Abbildung 20).

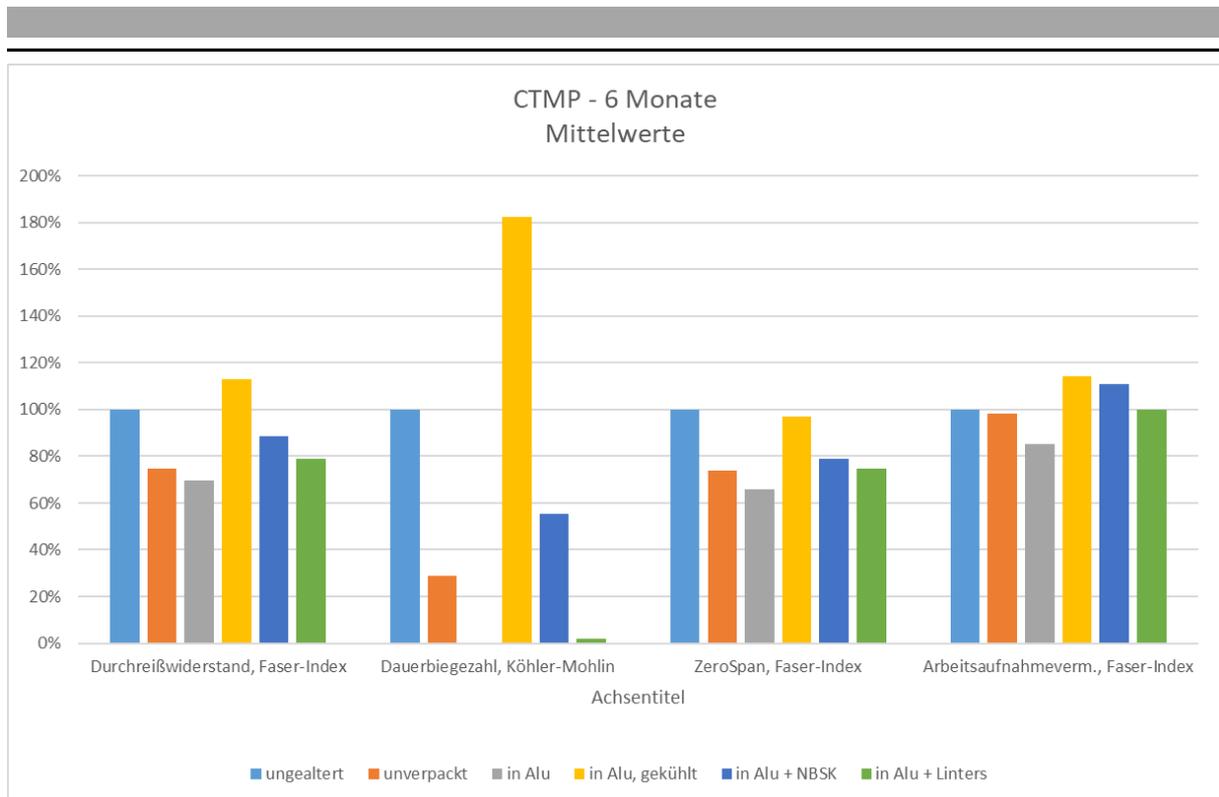


Abbildung 19 CTPM in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert

Auffällig ist das stark schwankende Verhalten der Dauerbiegezahl. Wie schon erwähnt, handelt es sich bei dem Wert um eine logarithmische Angabe. Da der Ausgangswert ungealtert absolut bei 0,268 liegt, bedeutet dies, dass schon das ungealterte Laborblatt im Schnitt nur 1,85 Faltungen aushält, bis es bricht. Dieser Wert ist niedrig und besagt, dass das CTMP-Laborblatt per se schon ungealtert keine ausreichende Festigkeit aufweist, um den Anforderungen an eine Dokumentenhandhabung gerecht zu werden. Die Veränderungen der Dauerbiegezahl bei CTMP sind daher nicht von Relevanz.

Betrachtet man den Stand nach 16 Monaten (Abbildung 20), so zeigt sich wiederum, dass sich die verschiedenen Varianten der beschleunigten und die der unbeschleunigten Alterung ähneln.

Die Dauerbiegezahl ist unverpackt und in Alu verpackt nach 16 Monaten Alterung nicht mehr messbar. Alle Proben reißen, bevor sie eine Falzung durchlaufen haben. Wird CTMP mit Linters oder NBSK zusammen verpackt, werden negative Prozentwerte ermittelt, d. h. die durchschnittliche Anzahl von Falzungen liegt unter 1. Viele Proben reißen schon, bevor sie einmal gefalzt werden konnten, manche schaffen aber eine Falzung. Der mit NBSK oder Linters gelagerte CTMP stellt sich diesbezüglich also besser dar als der pur gelagerte.

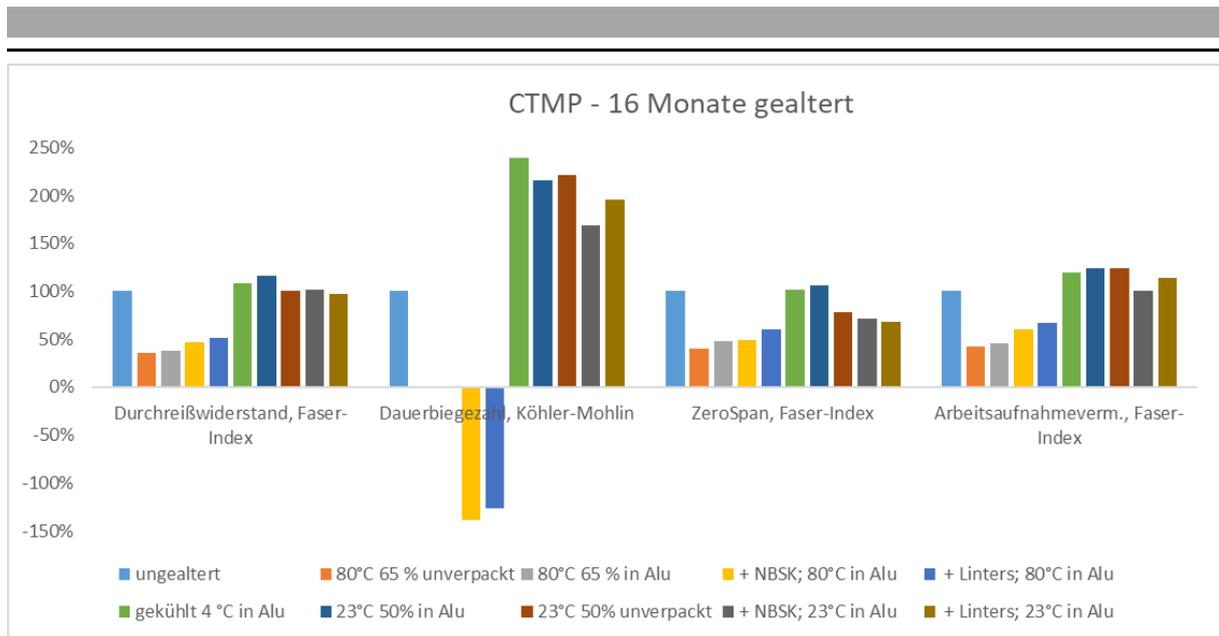


Abbildung 20 CTMP in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert

Dass manchmal ein Anstieg der mechanischen Eigenschaften vorzuliegen scheint, ist ebenfalls auf das insgesamt niedrige Niveau der Werte verglichen mit Linters oder NBSK zurückzuführen. Reiner CTMP und damit nur aus ligninhaltigen Fasern bestehendes Papier ist weder vor noch nach einer Alterung als Dokumententräger zu empfehlen.

Im Gegensatz zur Alterung nach 6 Monaten (Abbildung 19) zeigen sich hier Unterschiede, ob der CTMP allein oder mit anderen Faserstoffen zusammengelagert wird. Sowohl die Varianten unverpackt als auch die in Alufolie mit Linters bzw. NBSK zeigen nach 16 Monaten unbeschleunigter Alterung beim Durchreißwiderstand und der Nullreißlänge (ZeroSpan) geringere Werte auf als die Variante CTMP in Alufolie.

Interessant ist, dass die Werte nach 16 Monaten Lagerung im Klimaraum bei 23 °C/50 % relativer Luftfeuchte höher sind als zu Beginn der Versuchsreihe, insbesondere bei der Dauerbiegezahl. Dies wurde auch bei Linters beobachtet, wenn auch nur bei der Dauerbiegezahl und den Arbeitsaufnahmevermögen. Es kann erklären, warum die Laborpapiere in den kurzen Alterungszeiträumen von 12 und 24 Tagen oft einen Anstieg der Festigkeitswerte gezeigt haben. Offensichtlich finden noch Reifungsprozesse direkt nach der Laborblattherstellung statt. Dieser Umstand ist neu und in der Fachliteratur bisher nicht erwähnt. Allerdings ist aus Fachgesprächen bekannt, dass am finnischen Forschungsinstitut KCL Zellstoffe, die als Referenz dienen sollen, zunächst 3 Jahre trocken und im Dunkeln gelagert werden. Zwei Mal pro Jahr wird der Zellstoff vermessen. Danach – so ist aus den Messungen ersichtlich – verändert sich auch die Viskosität des Zellstoffs nicht mehr (Eva Sandås 2023).

Der letzte in der Reihe der Laborpapiere noch verbliebene Faserstoff ist der gebleichte Langfaser-Zellstoff, der NBSK (Northern Bleached Sulfate Kraft).

Auch hier zeigt sich die schon erwähnte Beobachtung, dass über die nach DIN 6738 verlangte Alterung von 24 Tagen hinaus ein wesentlicher Abfall der Eigenschaften zu beobachten ist. Durchreißwiderstand und Dauerbiegezahl sinken sehr stark. Nach 12 und 16 Monaten ist die Dauerbiegezahl nicht mehr messbar. Die Nullreißlänge sinkt ebenfalls über die Alterungsdauer.

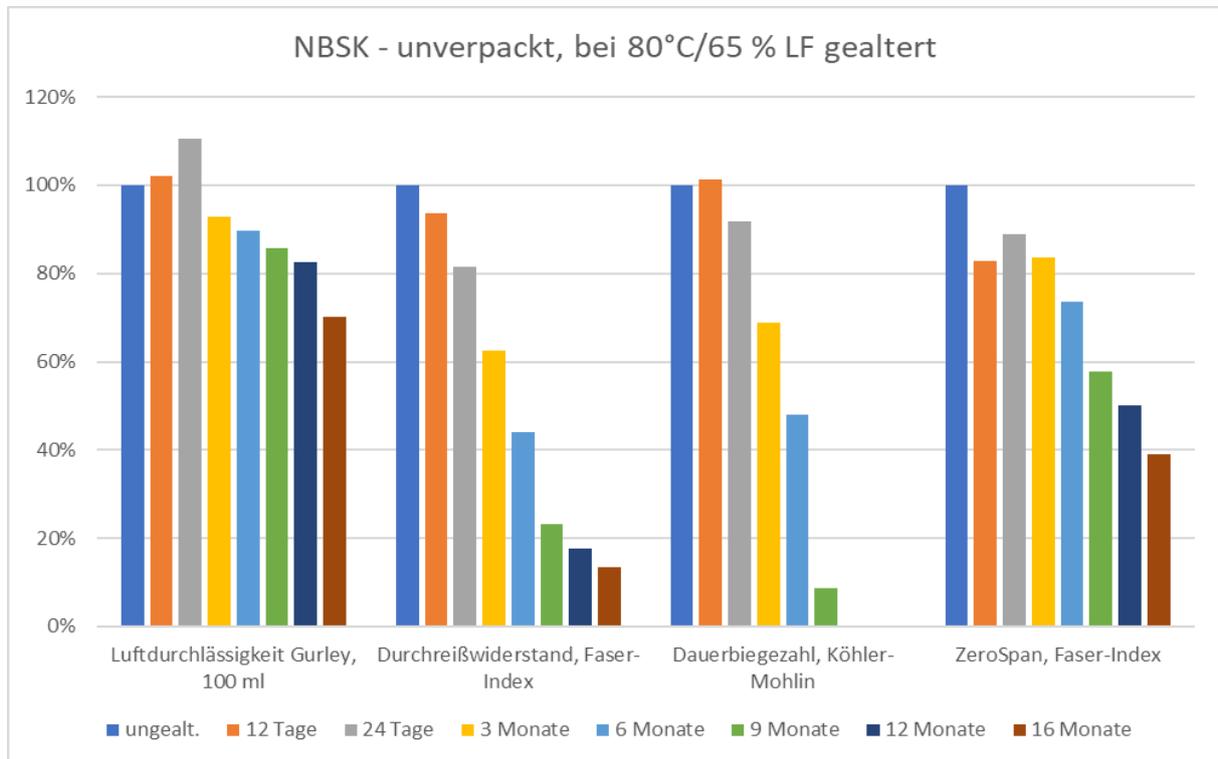


Abbildung 21 NBSK – Verlauf mechanischer Eigenschaften 0 - 16 Monate gealtert Teil 1

Der Luftdurchlässigkeit mag man hier eine fallende Tendenz zuweisen. Im Vergleich mit Linters und CTMP, wo keine signifikante Tendenz konstatiert wurde, ist fraglich, ob der Kurvenverlauf auch hier durch allgemeine Schwankungen zu erklären ist oder durch Alterung. Da an keinem Papier mehr diese Tendenz festgestellt wurde, hat das Ergebnis für die Empfehlungen das abgestimmten Papier – Schreib-/Druckstoffsystems keine Relevanz. Es ist aber auffällig und bedarf bei weiteren Forschungen einer genaueren Untersuchung, ob ein Verdichten des Papiers durch Alterung möglich ist. Bei den Fasermorphologischen Untersuchungen (siehe später Tabelle 28) soll das Ergebnis hier nochmals aufgegriffen werden.

Der E-Modul zeigt wieder zunächst eine uneinheitliche Tendenz, gegen Ende der Alterung steigt er stark an (Abbildung 22). Dies zu interpretieren ist schwierig. Die anderen Größen, Bruchkraft, Bruchdehnung und Arbeitsaufnahmevermögen sind hier eindeutig. Wiederum bildet das Arbeitsaufnahmevermögen das Gesamtverhalten während der Alterung gut ab.

Wenn man aus dem hohen E-Modul am Ende der Alterung eine Versprödung herauslesen könnte (das Papier wird steifer), dann zeigt sich, dass durch die Abnahme des Arbeitsaufnahmevermögens ebenso. Gemessen daran, dass über alle drei Rohstoffe, Linters, CTMP und NBSK, tendenziell ein Anstieg des E-Moduls über die Alterung vorzuliegen scheint, ist die Annahme, dass mit zunehmender Alterung eine Versprödung sich auch in einer Zunahme des E-Moduls zeigt, gerechtfertigt. Zur Beschreibung von Alterungsverläufen ist dennoch das Arbeitsaufnahmevermögen die bessere Größe, da sie sich im Alterungsverlauf einheitlicher verhält.

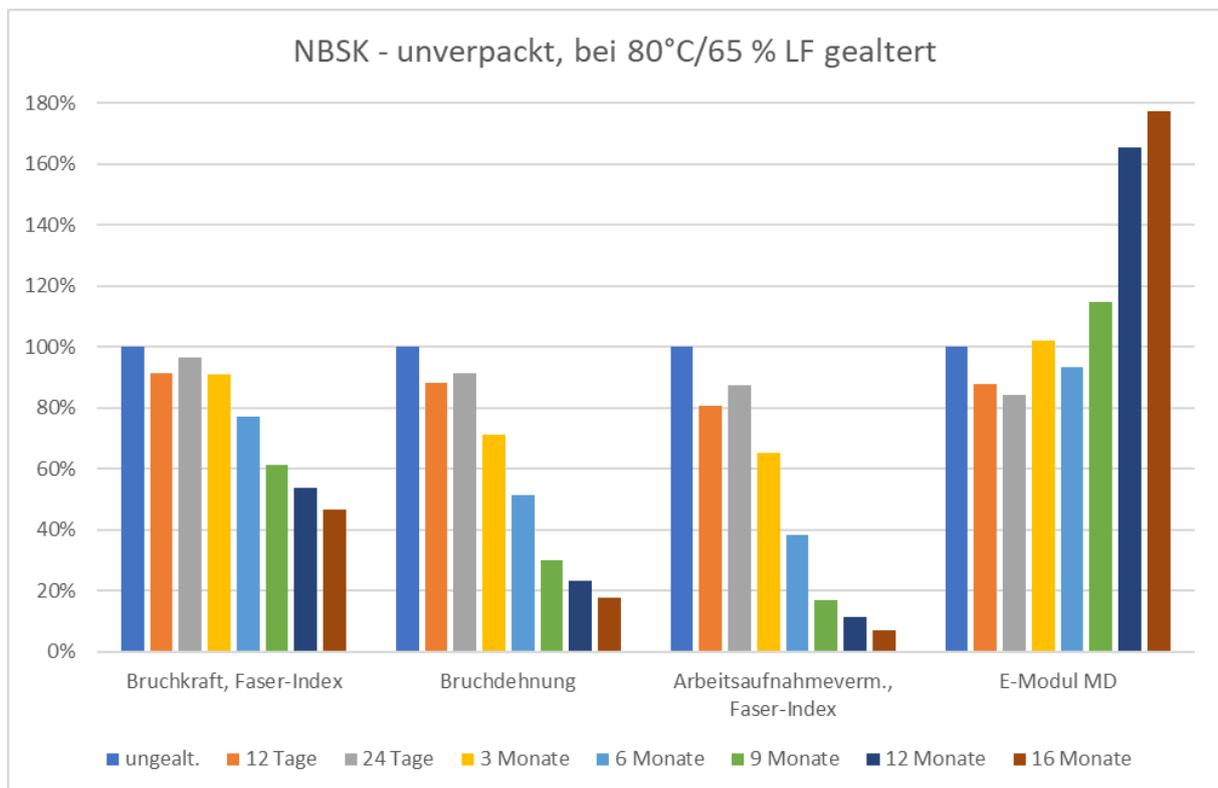


Abbildung 22 NBSK – Verlauf mechanischer Eigenschaften 0 - 16 Monate gealtert Teil 2

Die verschiedenen Varianten der Alterung zeigen nach 6 Monaten (Abbildung 23) wieder die konservierende Wirkung der Kühlung. Ebenso zeigt sich die schädliche Wirkung des CTMP. Wie schon bei Linters beobachtet, sinken die mechanischen Werte der NBSK-Laborblätter signifikant stärker, wenn sie mit CTMP zusammen in Alufolie verpackt gelagert und gealtert wurden. Allerdings zeigen sich keine großen Unterschiede in den Varianten unverpackt, in Alufolie ohne andere Fasern verpackt und in der Kombinationsverpackung mit Linters. Diese drei Varianten liegen auf ähnlichem Niveau, aber über der Variante mit beige-packtem CTMP.

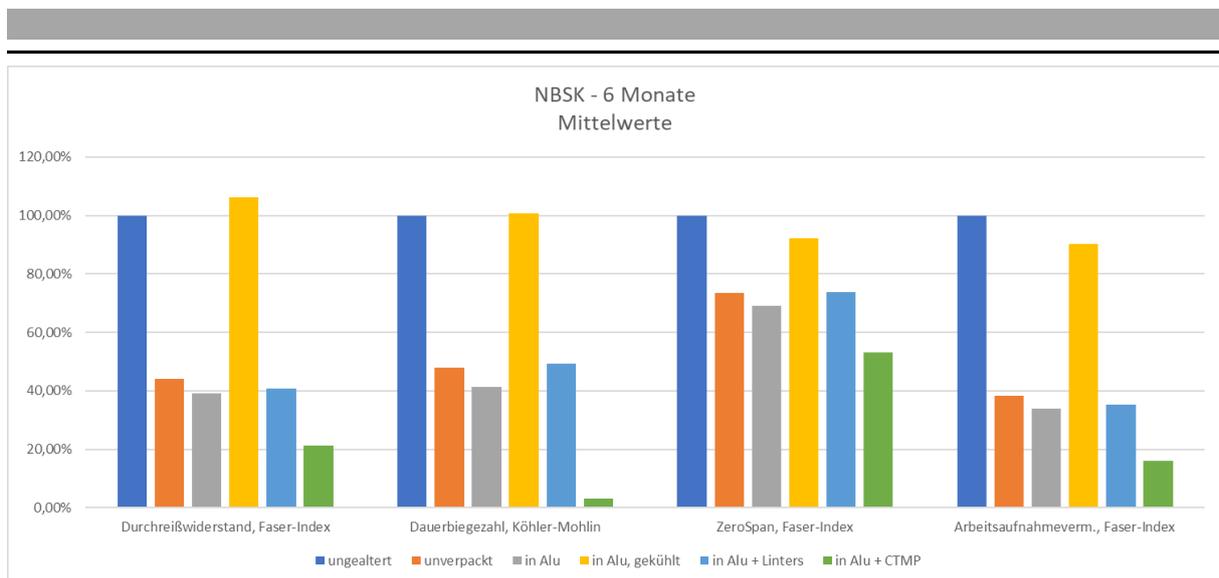


Abbildung 23 NBSK in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert

Dies ist bemerkenswert, denn die unverpackte Variante sollte wegen der bewusst in Kauf genommenen Kreuzkontamination eigentlich niedriger liegen als die in Alufolie verpackte Varianten. Dass ist nicht der Fall ist, aber die Verpackung zusammen mit CTMP einen deutlichen Einfluss hat, zeigt, dass für eine Wirkung der Kreuzkontamination die schädlichen Komponenten sehr dicht an der ligninfreien Faserkomponente gelagert sein müssen und dass zudem die Oxidationsprodukte nicht entweichen dürfen.

Abbildung 24 zeigt dies nochmals anhand des Verlaufs über 16 Monate. Die mechanischen Werte sinken gegenüber dem Ausgangszustand stark ab. Dieser Abfall ist nochmals stärker als bei Linters. Er kann durch die enge Lagerung mit ligninhaltigen Fasern und der Vermeidung des Abtransports von Oxidationsprodukten nochmals verstärkt werden. Die Dauerbiegezahl kann nach 16 Monaten nicht mehr gemessen werden, obwohl es sich nicht um einen ligninhaltigen Faserstoff handelt.

Die beschleunigt gealterten Varianten liegen auf einem einheitlich niedrigen Niveau, die natürlich gealterten bzw. die gekühlten Varianten liegen auf dem hohen Ausgangsniveau. Insbesondere bei der Nullreißlänge (ZeroSpan), etwas auch beim Arbeitsaufnahmevermögen zeigt sich, dass auch NBSK einer Kreuzkontamination unterliegt, wobei auch Linters die Werte bei NBSK negativ beeinflussen kann.

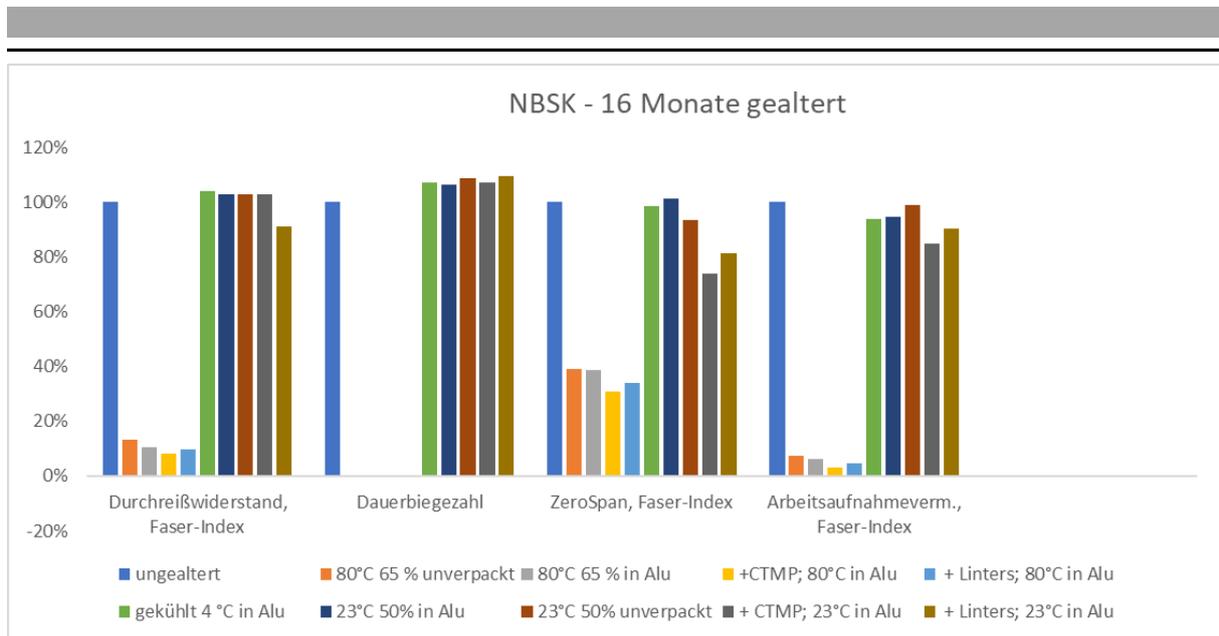


Abbildung 24 NBSK in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert

Final seien die Laborpapiere in einer Tabelle gegenübergestellt. Ausgewählt werden die mechanischen Eigenschaften, die laut verschiedenen Normen Mindestwerte beinhalten, die Papiere für die Langzeitlagerung einhalten sollen (siehe Tabelle 1). Da die Normen teils unterschiedliche Werte vorschreiben, finden sich in dem Fall in der folgenden Tabelle 4 die Maximal- und die Minimalwerte der verschiedenen Mindestwerte. Angegeben sind hier die gemessenen Werte in ihren Einheiten, keine normierten Werte wie in den Abbildungen vorher.

Die ISO 9706 verlangt beim Durchreißwiderstand 350 mN zum Ausgangszeitpunkt, der einzige Festigkeitswert, den diese Norm als Mindestfestigkeit vorsieht. Daher ist er in der Tabelle ebenfalls angegeben.

Die Werte stammen von den unverpackten Proben. Sie stellen das realistische Szenario dar. Die gealterten Werte sind die nach 9 Monaten künstlicher Alterung bei 80 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit gemessenen. Dieser Zeitpunkt wurde gewählt, weil da der Dauerbiegewiderstand für CTMP zumindest noch bei 0 liegt, d. h. es wird im Schnitt eine Falzung bis zum Bruch erzielt. Linters und NBSK erreichen nach 9 Monaten etwa den Wert, den CTMP vor der Alterung innehatte. Es zeigt sich, wie empfindlich der Dauerbiegewiderstand als Messgröße reagiert. Er findet sich daher, ausgenommen die NEN 2728, nur in den Normen, die besonders hochwertige, für Alterungsbeständigkeit geeignete Papiere klassifizieren wollen.

Tabelle 4 Gegenüberstellung Laborpapiere zu Norm-Anforderungen

		Durchreiß- widerstand	Dauerbiege- widerstand	Bruch- kraft	Bruchdeh- nung
Sollwert aus Normen	max	480/350 mN	2,24		
	min	50 mN	1,7	5 N	0,5 %
Linters	Start	535 mN	0,58	18,4 N	2,1 %
	Gealtert, 9 M	296 mN	0,27	16 N	1,3 %
	Verlust	45 %	53 %	13 %	38 %
CTMP	Start	372 mN	0,27	23,5 N	1,0 %
	Gealtert, 9M	180 mN	0,00	23 N	0,7 %
	Verlust, %	52 %	100 %	0,02 %	30 %
NBSK	Start	1.287 mN	2,83	74,4 N	3,8 %
	Gealtert, 9M	316 mN	0,24	45,4 N	1,2 %
	Verlust, %	75 %	92 %	39 %	68 %

Die Absolutwerte sind zur Einschätzung des tatsächlichen Niveaus, auf dem sich die Messungen befinden, wichtig. Es handelt sich aber nicht um optimierte Laborpapiere, die eine besondere Alterungsbeständigkeit oder eine besonders hohe Anfangsfestigkeit aufweisen sollen. Ziel war es, das Alterungsverhalten der unterschiedlichen Fasertypen einschätzen zu können und wie sie sich gegenseitig beeinflussen. Das ist gelungen. Im Schnitt verliert die Lintersfaser über 9 Monate bei den hier betrachteten Eigenschaften 37 % vom Ausgangsniveau, der CTMP verliert im Schnitt 46 % und der NBSK sogar 69 %. Letzteres überrascht, schließlich ist der NBSK ein Faserstoff, der den Anforderungen der ISO 9706 entspricht, der CTMP hingegen, der diesbezüglich besser abschneidet, nicht.

An dieser Stelle muss nochmals angemerkt werden, dass es sein kann, dass durch die gewählten forcierten Alterungsbedingungen Reaktionen hervorgerufen werden, die bei niedrigeren Temperaturniveaus nicht stattfinden würden. Eine Einschätzung, ob das der Fall ist, soll die Betrachtung der Alterung nach DIN ISO 5630-5 ermöglichen. Bei dieser Alterungsmethode beträgt die Temperatur 100 °C, die Proben befinden sich in einem abgeschlossenen Gefäß, d. h. eventuell entstehenden Abbauprodukte können nicht entweichen. Eine Autooxidation wird so begünstigt. Einen ähnlichen Zustand hat man in den in Alufolie verpackten Proben.

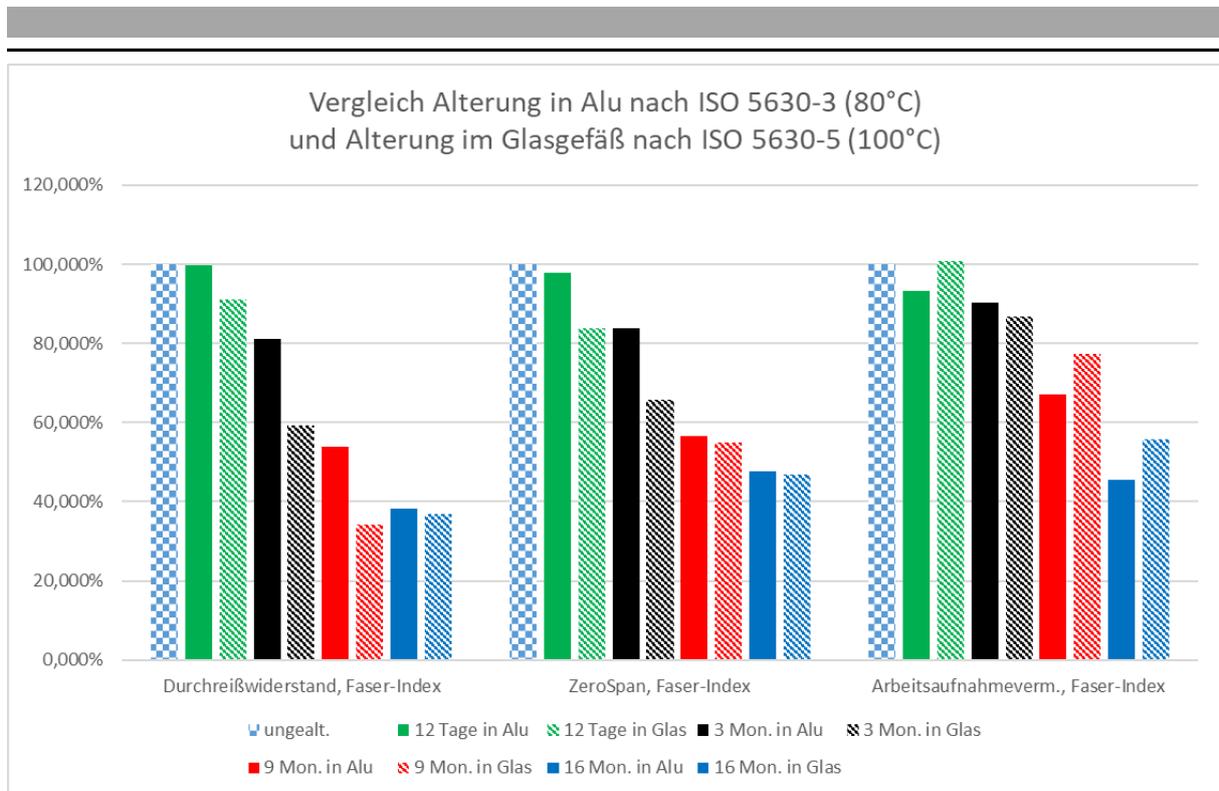


Abbildung 25 CTMP – Alterung in Alu bei 80 °C und in Glas bei 100 °C

Die Unterschiede zeigen sich in Abbildung 25. Der erste Balken zeigt das ungealterte Laborpapier, dann finden sich nebeneinander jeweils die bei 80 °C und bei 100 °C gemessenen Proben. Man sieht, dass die Alterung bei 100 °C zu niedrigeren Werten führt als die bei 80 °C, zumindest bei Durchreißwiderstand und der Nullreißlänge. Anscheinend werden bei den unterschiedlichen Temperaturen ähnliche Reaktionen hervorgerufen, die reaktionskinetisch bei 100 °C schneller verlaufen und sich in den mechanischen Eigenschaften zeigen. Beim Arbeitsaufnahmevermögen mag sich hier niederschlagen, dass der Wert drei Größen zusammenfasst, die sich für sich schon einheitlich darstellen (wie oben schon erläutert). Gewählt wurde CTMP, weil bei diesem Faserstoff die stärksten Veränderungen stattfinden. Die Erkenntnisse gelten aber auch für die beiden anderen Faserstoffe. Nach 16 Monaten beschleunigter Alterung finden sich diese Unterschiede nicht mehr, die Alterung scheint langsamer zu verlaufen. Hier eröffnet sich die Möglichkeit, in einer weitergehenden Datenanalyse die Arrhenius-Gleichung anzuwenden und reaktionskinetische Auswertungen durchzuführen. Dies ist jedoch im Rahmen des Projektes „Labest Papier“ nicht Teil der Leistungsbeschreibung.

Industriepapiere, unbedruckt

Analog zum Vorgehen bei den Laborpapieren soll mit der Vorstellung der Werte des Hadernpapiers begonnen werden. Im Gegensatz zu den Laborpapieren spielt bei den Industriepapieren die Richtung, in der die Festigkeitswerte gemessen werden, eine große Rolle. Darauf wird beim Hadernpapier näher eingegangen, später aber nicht mehr. Der Verlauf der Werte in MD

(machine direction = die Längsrichtung der Papierbahn) und CD (cross direction = die Quer-
richtung der Papierbahn) ähnelt sich sehr, lediglich die Absolutwerte liegen auseinander. Für
die Einschätzung des Alterungsverhaltens reicht daher die Betrachtung einer Richtung.

Abbildung 26 zeigt den Verlauf der schon bei den Laborpapieren ausgewählten mechanischen
Eigenschaften. Da die Luftdurchlässigkeit auch bei den Industripapieren im Verlauf der Alte-
rung keine Tendenz zeigt, wird sie ab hier nicht mehr aufgeführt und nicht weiter betrachtet.

Über alle dargestellten Eigenschaften hinweg zeigt sich, dass bis zum 6. Monat wenig Rück-
gang der mechanischen Eigenschaften zu verzeichnen ist. Danach erst wird der Abfall deut-
lich.

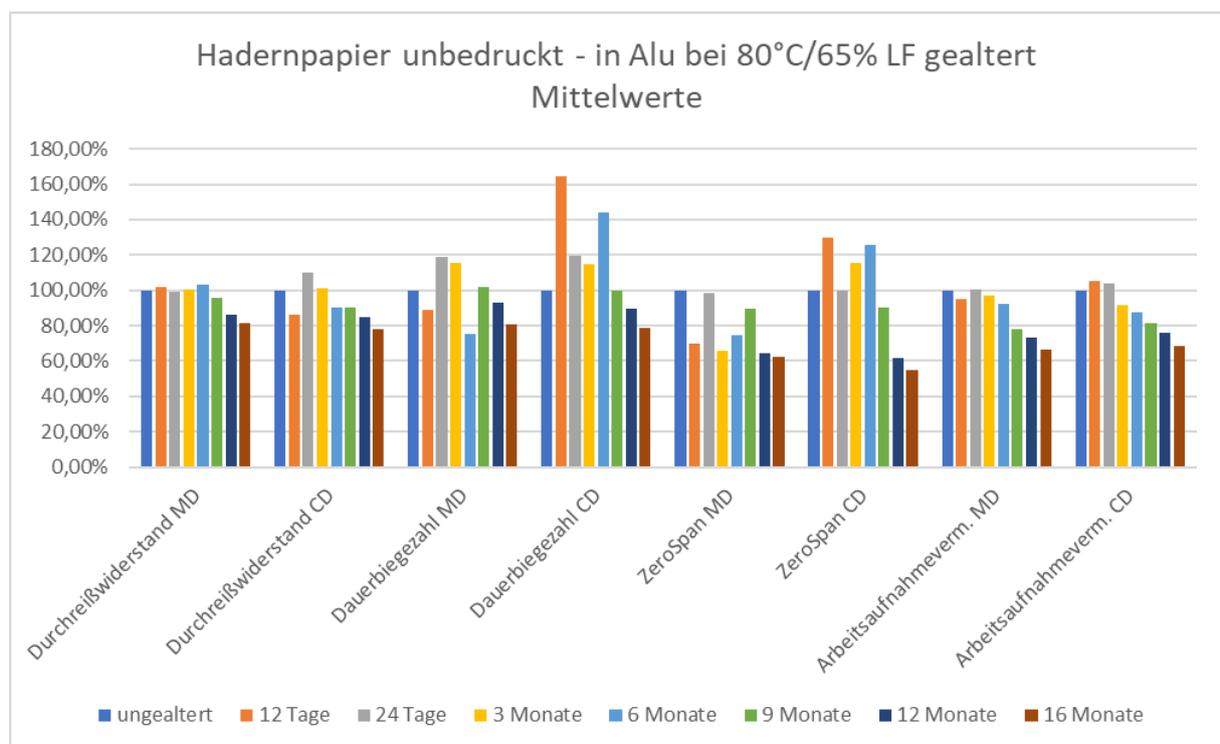


Abbildung 26 Hadernpapier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Die Werte für den Dauerbiegewiderstand und die Nullreißlänge (in der Abbildung ZeroSpan
genannt) ragen hier heraus, da es zu Beginn der Alterung zu deutlichen Überhöhungen ge-
genüber dem ungealterten Wert kommt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass beide Mes-
sungen sehr empfindlich auf Änderungen der Randbedingungen reagieren. Die Überhöhun-
gen dürfen daher nicht zu sehr bewertet werden. Trotzdem bleibt festzustellen, dass auch nach
16 Monaten Alterung die Dauerbiegezahl noch bei 80 % des Ausgangswertes liegt. Das La-
borblatt aus Linters erreicht diese Grenze schon nach ca. 6 Monaten. Auch die anderen Werte
des industriell hergestellten Papiers fallen weniger stark ab als beim Laborblatt. Hadernpapier
erweist sich als resilienter. Dies mag an der Qualität der Lintersfaser liegen, die im Laborblatt
andres als im Hadernpapier ist. D. h. allein der Fasertyp, wie in ISO 9707, ISO 11108 oder

UNI 10332 beschrieben, ist noch nicht aussagekräftig genug. Mindestwerte der Festigkeit vor der Alterung sind genauso wichtig.

Komplementär zum Haderpapier ist das Recyclingkopierpapier, welches auf Laborblattseite den CTMP-Faserstoff als Pendant hat.

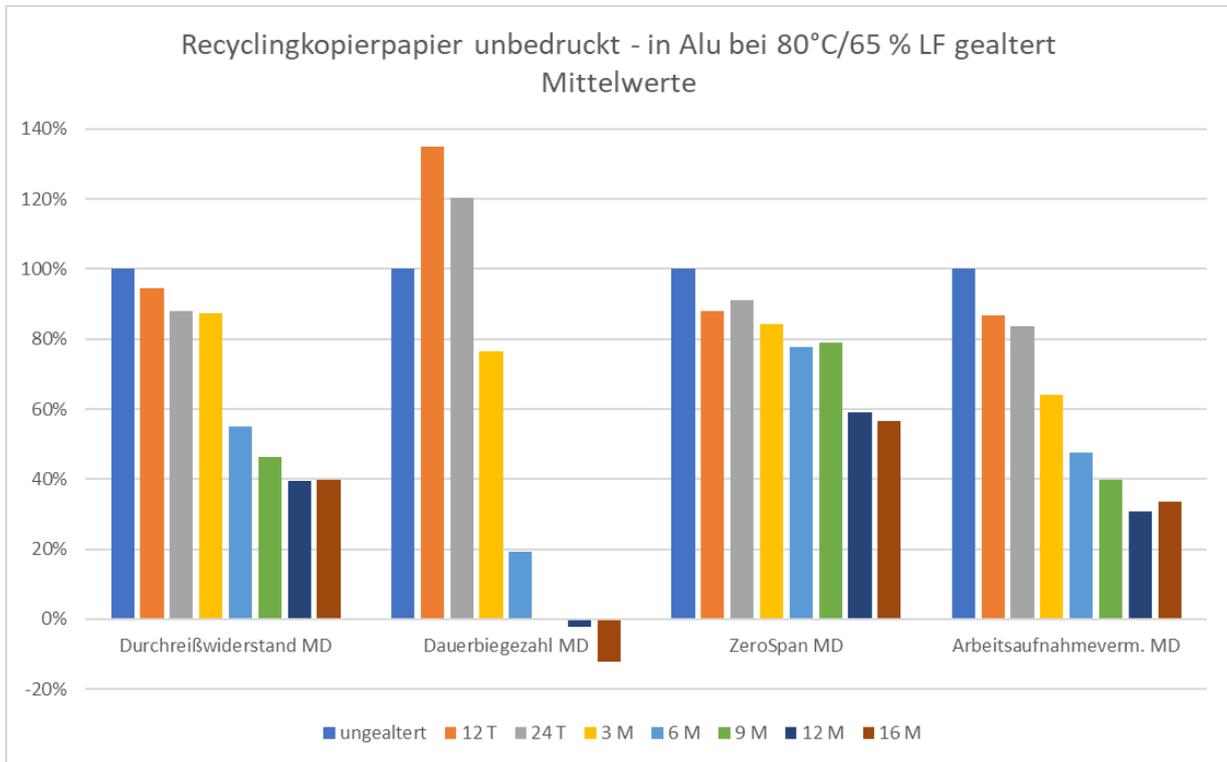


Abbildung 27 Recyclingkopierpapier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Im Gegensatz zu den Laborpapieren aus CTMP und NBSK zeigt das Recyclingkopierpapier nach 16 Monaten noch eine messbare Dauerbiegezahl. Das Industrierpapier besteht aus einer Mischung dieser Faserstofftypen, zeigt sich aber beständiger als die reinen Faserstoffe.

Ausgenommen die Dauerbiegezahl scheint sich bei den Parametern gegen Ende der Alterung der Rückgang der Werte zu verlangsamen. Beim Haderpapier war das noch nicht der Fall. Diese Möglichkeit, dass mechanische Eigenschaften bei der Alterung einem Grenzwert zustreben, wird bei den kommenden Papieren näher untersucht.

Das nächste betrachtete Industrierpapier ist das holzfrei weiße Kopierpapier, welches den Anforderungen der ISO 9706 genügt. Es korrespondiert zum NBSK-Laborblatt. Bei diesem Papier sind in gemäß der Leistungsbeschreibung alle Zeitpunkte erfasst worden. Abbildung 28 zeigt daher die Alterung in Tagen nach DIN 6380, sodann den monatlichen Verlauf bis zum Versuchsende nach 16 Monaten.

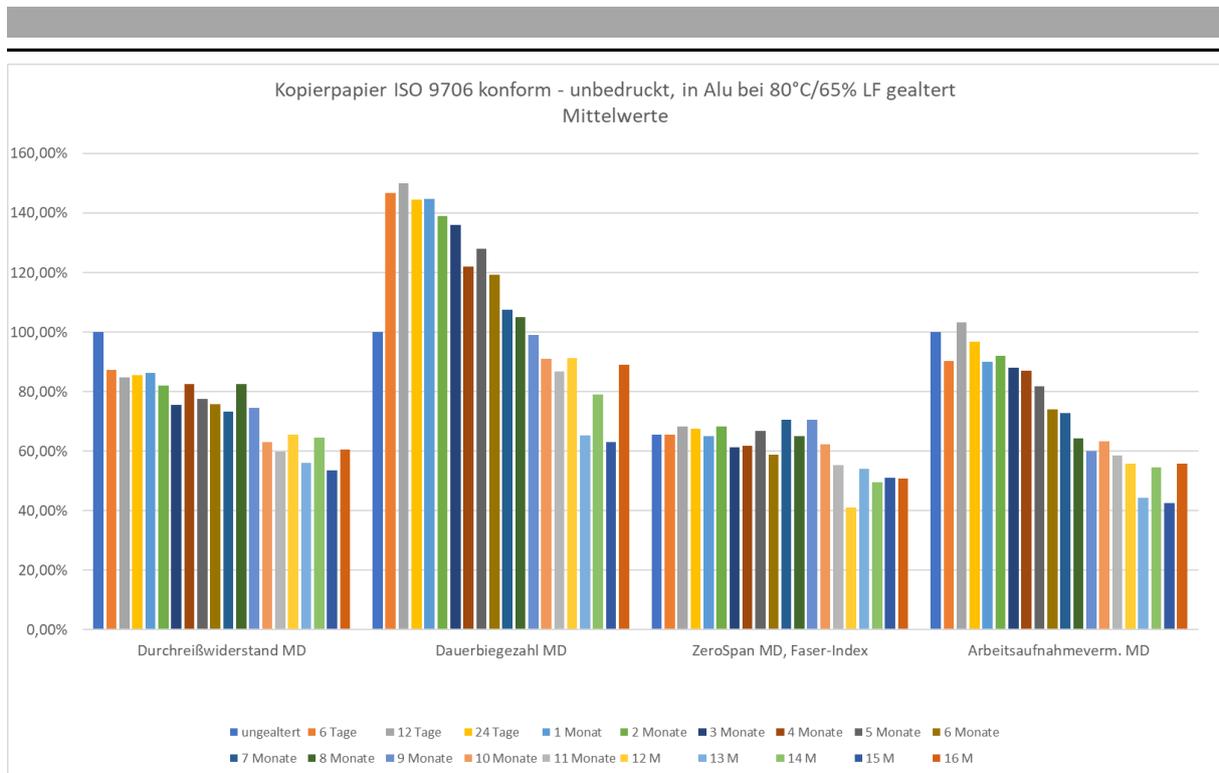


Abbildung 28 Kopierpapier ISO 9706 konform – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

An diesem Papier zeigt sich ebenfalls gegen Ende der Alterung, dass die Werte nicht mehr unbedingt fallen. Teilweise zeigen sich sogar leichte Anstiege. Wie eben beim Recyclingpapier kann in Betracht gezogen werden, dass die Alterung sich verlangsamt und die Werte weniger schnell zurückgehen.

Auffällig ist wiederum der Anstieg der Dauerbiegezahl über die ersten Alterungsperioden. Dieser schon des Öfteren beobachtete Umstand weist erneut darauf hin, dass die laut DIN 6738 vorgesehenen Alterungszeiträume von 6, 12 und 24 Tagen nicht ausreichend sind, um tatsächlich einen Alterungsprozess sichtbar zu machen. Das hier vorliegende Papier scheint erst nach zwei Monaten künstlicher Alterung deutliche Festigkeitseinbußen aufzuzeigen.

Nachdem die primär als Büro- und damit als Dokumentationspapier in Frage kommenden Papiere hinsichtlich ihres mechanischen Alterungsverhaltens dargestellt und der Bezug zu den jeweiligen Hauptfaserstoffen über die Laborpapiere hergestellt worden ist, wird im Folgenden auf weitere repräsentative Industripapiere gemäß der mit dem BASE abgestimmten Testmatrix eingegangen.

Begonnen wird mit einem holzfrei weißen Papier, welches eine Beschichtung speziell für eine gute Inkjet-Druckqualität aufweist (Abbildung 29). Die starke Ähnlichkeit des Alterungsverhaltens verglichen mit dem ISO 9706-konformen Kopierpapier ist unverkennbar. Da es sich beide Male um ein Papier der Sorte holzfrei weiß handelt, dürfte diese Ähnlichkeit auf den Faserein-

satz – ligninfreie Fasern – zurückzuführen sein. Die für die besondere Inkjet-Tauglichkeit auf-gebrachte Beschichtung macht sich im Alterungsverlauf der mechanischen Eigenschaften nicht bemerkbar.

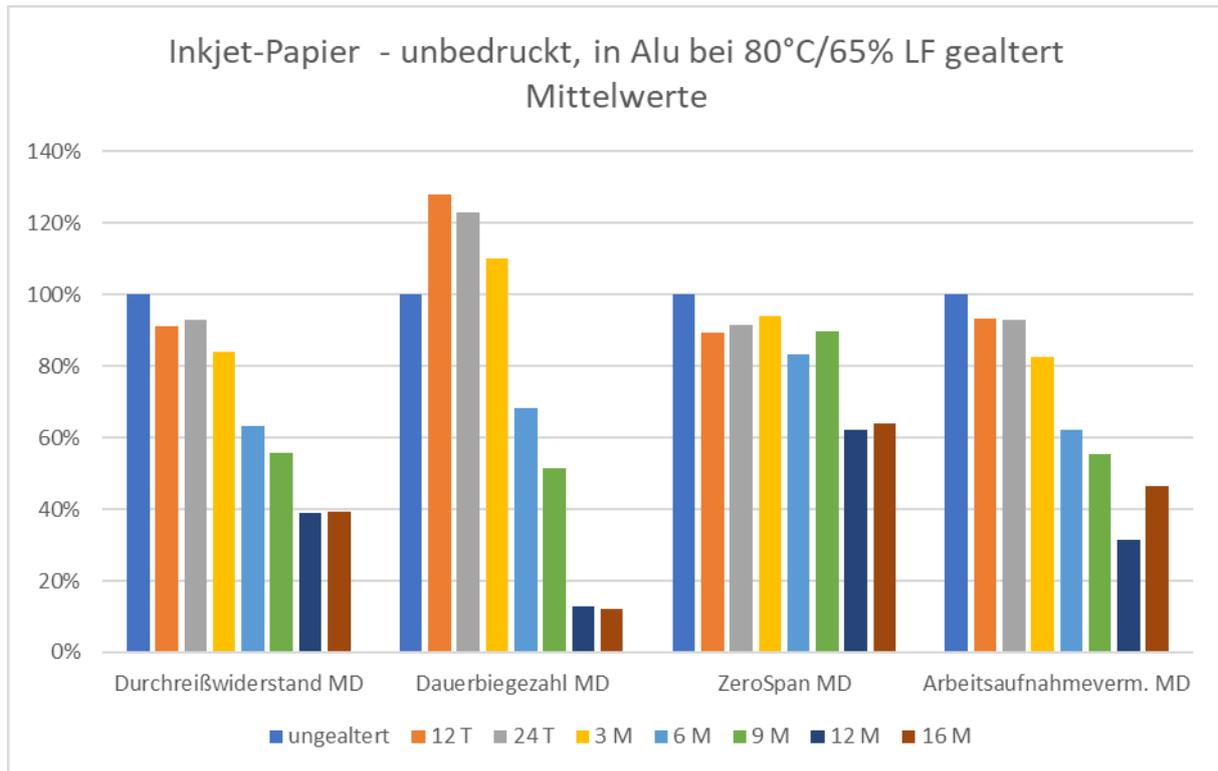


Abbildung 29 Inkjet-Papier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Auch dieses Papier zeigt im Verlauf über die letzten beiden Monate nur noch wenig Veränderung in seinen Werten, der Alterungsverlauf scheint verlangsamt oder gestoppt.

Das nächste betrachtete Papier ist ein ebenfalls holzfreies, aber gestrichenes Papier. Im Vergleich zu den ungestrichenen holzfreien Papieren zeigt es teilweise einen geringeren Abfall in den Festigkeiten, außer bei der Dauerbiegezahl. Deren Abfall auf fast 10 % könnte am Einfluss des Strichs liegen. Das mit 167 g/m² recht schwere Papier verdankt seine hohe Masse zu 48 % anorganischen Pigmenten, die nicht zur Festigkeit beitragen und die Flexibilität des Papiers stören können.

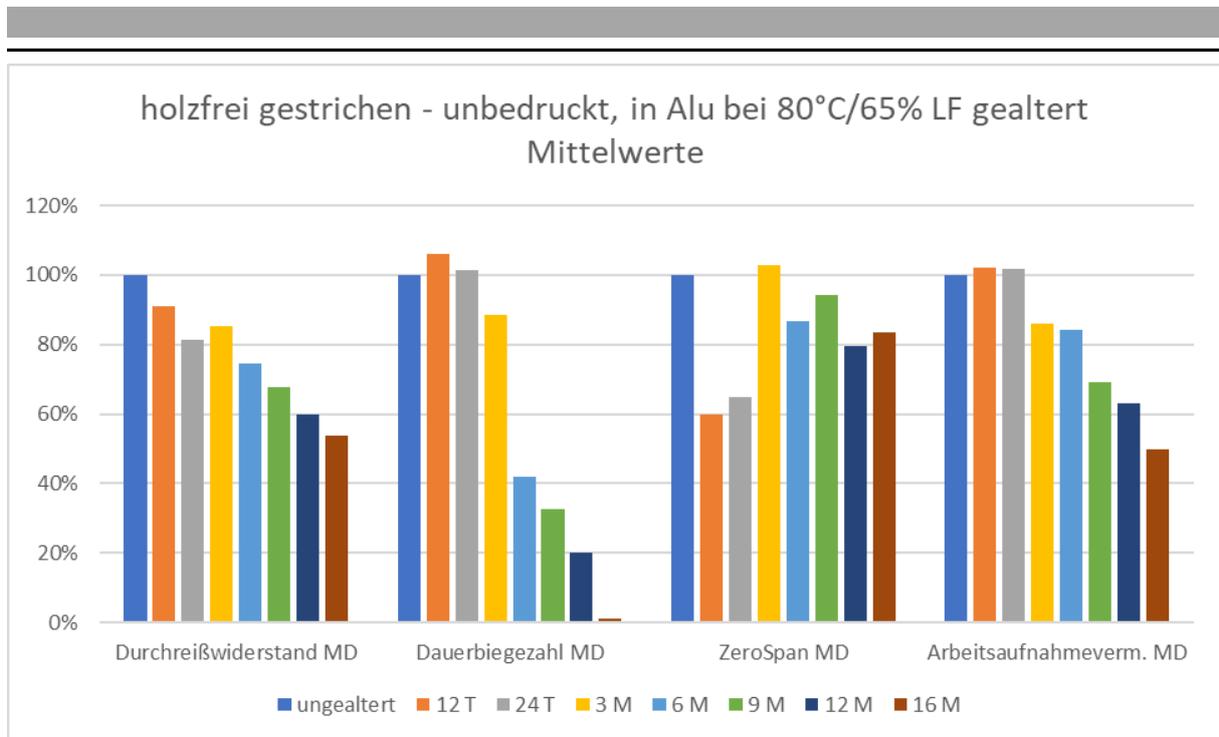


Abbildung 30 holzfrei gestrichen – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Hier zeigt sich keine Verlangsamung der Festigkeitsabnahme zum Ende der Laufzeit (außer bei der Nullreißlänge). Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Strich das Papier im Inneren schützt und die Alterung deswegen langsamer vonstattengeht. Dies kann an der Strichzusammensetzung liegen, da in diesem viel CaCO_3 enthalten ist. Möglicherweise wirkt sich hier eine puffernde oder adsorbierende Eigenschaft des Calciumcarbonats aus. Schädliche Substanzen werden im Innern durch den Füllstoff gebunden, von außen durch die Strichschicht. Dies könnte auch erklären, warum die Industripapiere durchweg besser abschneiden als die Laborpapiere. Die Industripapiere haben fast alle (bis auf das Hadernpapier) deutlich mehr Calciumcarbonat als die Laborpapiere.

Das komplementäre Papier zum holzfrei gestrichenen ist das holzhaltig gestrichene Offset- und Tiefdruckpapier (Abbildung 31).

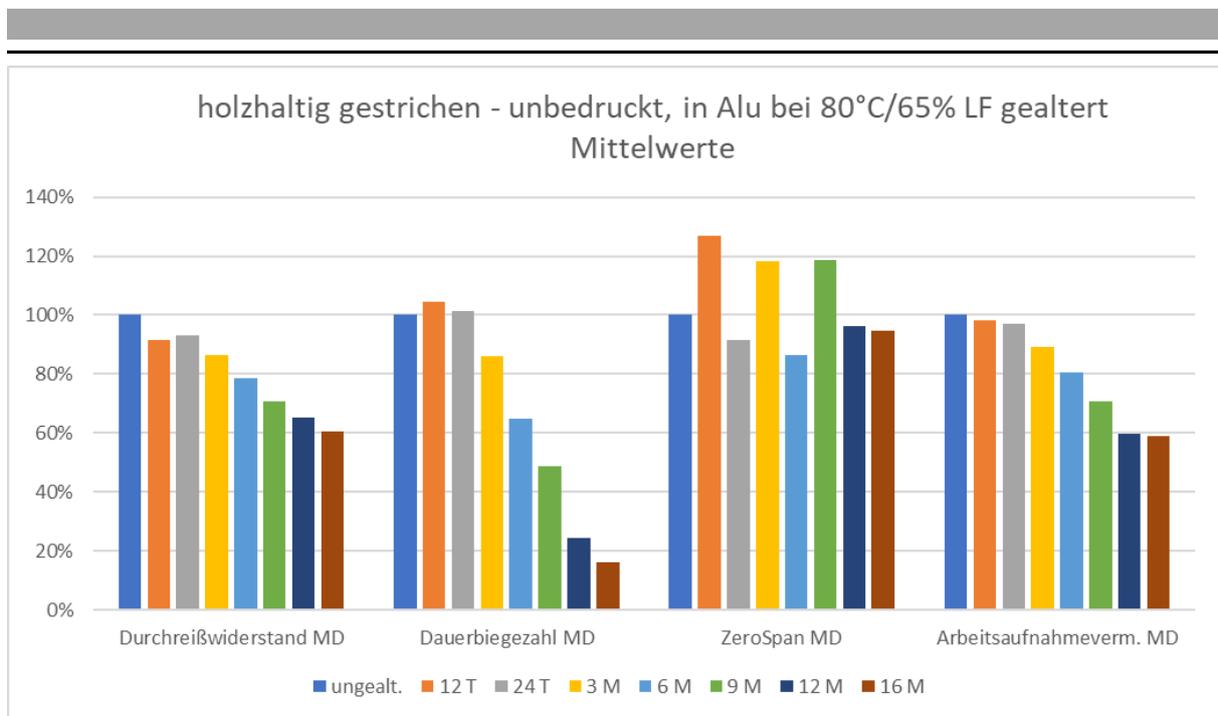


Abbildung 31 holzhaltig gestrichen – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Die Werte zeigen den schon öfter beobachteten uneinheitlichen Verlauf bei der Nullreißlänge (ZeroSpan). Alle anderen dargestellten Werte fallen über die Alterungsperioden. Dabei stellt sich das holzhaltig gestrichene Papier leicht besser dar als die holzfrei gestrichene Variante. Es ist mit ca. 89 g/m² nur ca. halb so schwer wie das holzfreie mit 167 g/m². Dies mag der Grund sein, warum die Dauerbiegezahl nicht ganz auf Null abfällt, wie in Abbildung 30 beobachtet. Es mag auch ein Hinweis darauf sein, dass die Anwesenheit von Lignin sich auch positiv auswirken kann. So wurde von (Zervos 2010) gefunden, dass Lignin zwar bei beschleunigter Alterung schneller degradiert als Cellulose, das Polymer aber einen hemmenden Effekt auf Pilzwachstum hat. Auch kann teilweise wieder eine Verlangsamung des Alterungsprozesses gegen Ende beobachtet werden. Die Rückgangrate ist wiederum geringer als bei den ungestrichenen Papieren. Damit werden die Ergebnisse beim holzfrei gestrichenen Papier bestätigt, was den „Schutz“ des innen liegenden Papiers angeht.

Ohne Strich und dessen potenziell schädliche Bindemittel und Additive stellt sich das holzhaltig ungestrichene Offset- und Tiefdruckpapier dar. Es ist ähnlich dem Recycling-Kopierpapier ein holzhaltiges Naturpapier. Wie dieses verliert auch das Offset-/Tiefdruck-Papier sehr stark an der Doppelfalzzahl und tendiert hier gegen Null. Dass dies erst später als beim Recycling-Kopierpapier passiert, dürfte der Tatsache geschuldet sein, dass dieses Papier ein Frischfaserpapier mit definierter Faserrezeptur ist, zudem mit einem bewusst zur Festigkeitssteigerung eingesetzten Zellstoffanteil. Das Recyclingpapier ist demgegenüber undefiniert in der Zusammensetzung seiner Fasertypen.

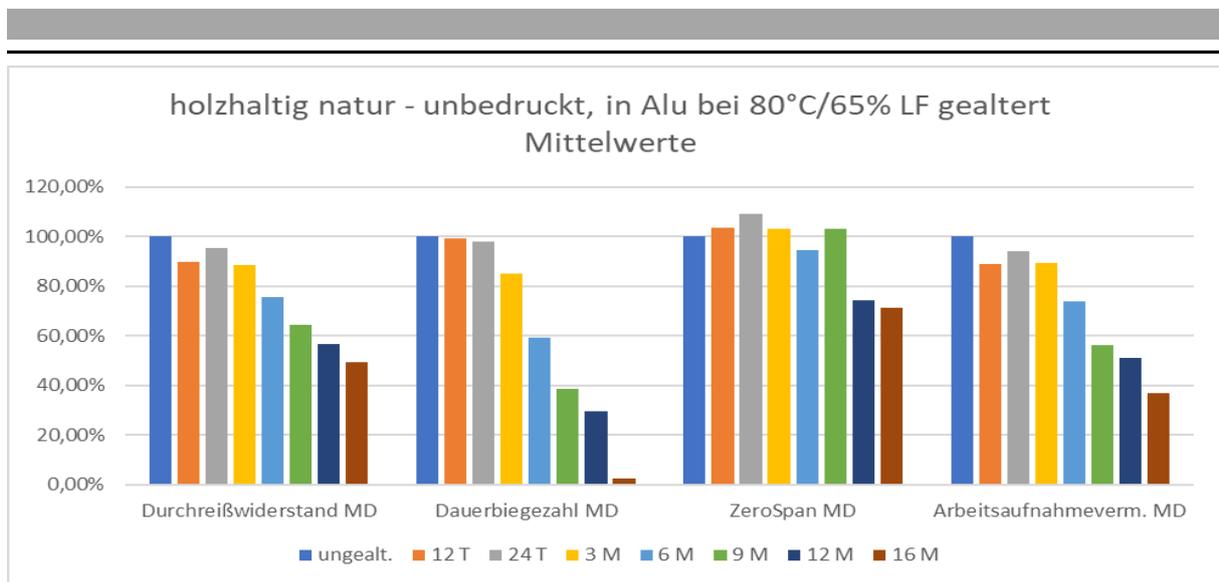


Abbildung 32 holzhaltig natur – unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert

Das Naturpapier zeigt eher einen stärkeren Abfall in den Festigkeitswerten als das gestrichene. Die Befürchtung, Bindemittel und Additive könnten die Alterung beschleunigen, wird in dieser Untersuchung nicht bestätigt. Im Gegenteil, die gestrichenen Papiere zeigten tendenziell einen prozentual niedrigeren Abfall der Festigkeitswerte als die ungestrichenen Papiere (ausgenommen das Hadernpapier, welches die bisher geringsten Einbußen an Festigkeiten zu verzeichnen hatte).

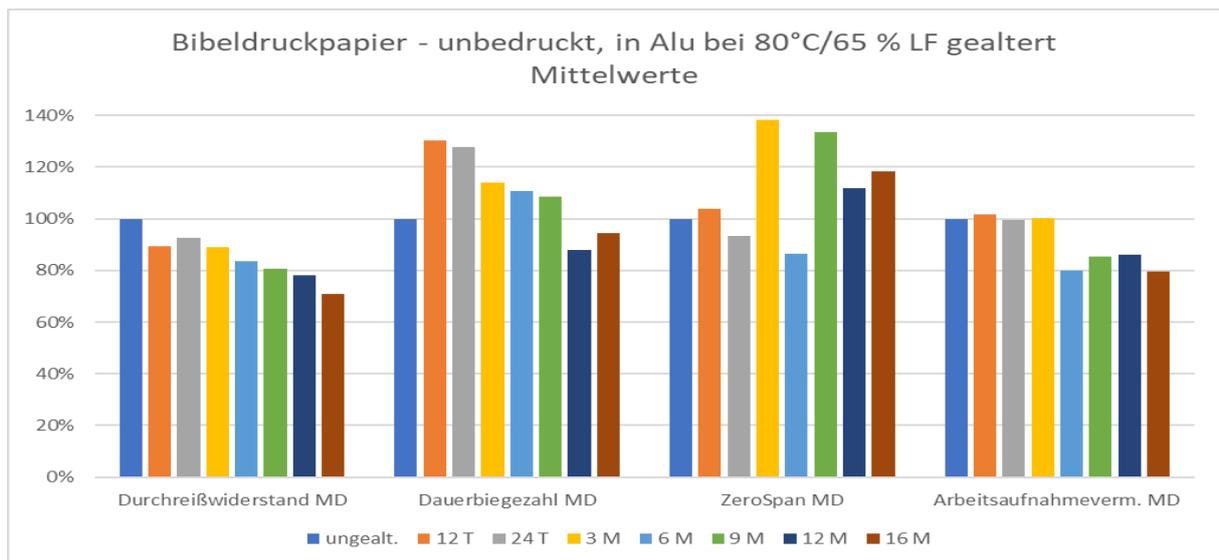


Abbildung 33 Bibeldruckpapier – unbedruckt, in Alu im bei 80 °C/65 % LF gealtert

Zuletzt wird die Sondersorte Bibeldruckpapier, an der sich kaum Alterungserscheinungen zeigen, dargestellt (Abbildung 33).

Das Bibeldruckpapier stellt sich besser dar als das Hadernpapier. Von diesem unterscheidet es sich durch:

- Einen insgesamt höheren Füllstoffgehalt (37 % in Summe gegenüber 7 % beim Hadernpapier)
- Höheren Calciumcarbonatgehalt (22 % gegenüber 7 % beim Hadernpapier)
- Einen Kaolinanteil im Füllstoff von 8 % (im Hadernpapier ist kein Kaolin enthalten)
- Einer weiteren Füllstoffkomponente, Titandioxid, von ca. 7 %, die in den anderen Papieren nicht enthalten ist; Titandioxid ist ein teurer Füllstoff, der bei Papieren den Weißgrad und die Opazität verbessert; für ein dünnes Papier von nur 39 g/m² macht dieser Füllstoff entsprechend Sinn
- Die stärkere Mahlung der Fasern bei der Papierherstellung; dies zeigt sich in der Bruchkraft, die in Längsrichtung als Faserindex (d. h. bereinigt um die flächenbezogene Masse und den Füllstoffgehalt) bei 87 Nm/g liegt; Hadernpapier liegt bei 28 Nm/g
- Die starke Kalandrierung; diese zeigt sich in der niedrigen Luftdurchlässigkeit, deren Messwert mit durchschnittlich 145 s für 100 ml Luft deutlich über den 3 s bei Hadernpapier liegt; der hohe Wert kommt allerdings nicht nur durch die Kalandrierung zustande, sondern auch durch stärkere Mahlung der Fasern

Auffällig sind die überhöhten Werte für die Nullreißlänge (ZeroSpan) nach drei und neun Monaten Alterung sowie der Anstieg zum Ende hin. Eine besondere Ursache konnte hierfür nicht festgestellt werden, außer der bei den Parametern Dauerbiegezahl und Nullreißlänge häufigeren Feststellung, dass diese Werte sehr empfindlich sind und durch eventuelle Reifungs- oder Ausgleichsprozesse angehoben werden können.

Des Weiteren zeigen sich zum Ende der Alterung wiederum leichte Anstiege bei der Dauerbiegezahl und der Nullreißlänge (ZeroSpan), das Arbeitsaufnahmevermögen zeigt einen schwankende und keine fallende Tendenz mehr. Dies kann erneut als Hinweis auf sich verlangsamernde Alterungseffekte gedeutet werden.

Über alle Papiere hinweg zeigt sich nun mehrfach, dass nach 16 Monaten die Alterung in vielen Fällen nicht mehr so rasch vonstatten geht wie zu Beginn der Versuche.

Tabelle 5 Gegenüberstellung Industripapiere zu Norm-Anforderungen

		Durchreißwi- derstand	Dauerbie- gewider- stand	Bruch- kraft	Bruchdehnung
Sollwert aus Normen	max	480/350 mN	2,24		
	min	50 mN	1,7	5 N	0,5 %
Hadernpapier, 125 g/m², 7 % Asche	Start	902 mN	1,2	49,1 N	2,1 %
	Gealtert, 9 M	849 mN	1,2	48,7 N	1,7 %
	Verlust	6 %	0 %	1 %	19 %
Recycl.-Copy, 78 g/m², 20 % Asche	Start	417 mN	1,1	54,1 N	1,5 %
	Gealtert, 9M	187 mN	0	43,4 N	0,8 %
	Verlust, %	55 %	100 %	20 %	47 %
ISO 9706 Copy, 79 g/m², 26 % Asche	Start	492 mN	1,07	69 N	1,7 %
	Gealtert, 9M	361 mN	1,06	60,1 N	1,2 %
	Verlust, %	27 %	1 %	13 %	29 %
Inkjet-Papier, 79 g/m², 22 % Asche	Start	604 mN	1,61	61,1 N	1,5 %
	Gealtert, 9M	382 mN	0,83	53 N	1,0 %
	Verlust, %	37 %	48 %	13 %	33 %
hf' gestrichen, 168 g/m², 48 % Asche	Start	723 mN	1,36	90,1 N	1,4 %
	Gealtert, 9M	487 mN	0,44	88,3 N	1,0 %
	Verlust, %	33 %	68 %	2 %	29 %
hh' gestrichen, 88 g/m², 43 % Asche	Start	398 mN	2,00	57,4 N	1,5 %
	Gealtert, 9M	278 mN	0,98	54,1 N	1,1 %
	Verlust, %	30 %	51 %	6 %	27 %
hh' natur, 78 g/m², 22 % Asche	Start	483 mN	1,44	55,3 N	1,7 %
	Gealtert, 9M	304 mN	0,56	48,7 N	1,1 %
	Verlust, %	37 %	61 %	12 %	35 %
Bibeldruck, 33 g/m², 37 % Asche	Start	139 mN	1,55	32,5 N	1,4 %
	Gealtert, 9M	113 mN	1,68	31 N	1,3 %
	Verlust, %	19 %	- 8 %	5 %	7 %

Wie bei den Laborpapieren auch, erfolgt eine Gegenüberstellung der an den Industripapieren gemessenen Absolutwerte zu den Anforderungen der Normen (Tabelle 5). Wiederum erfolgt die Betrachtung bei 9 Monaten, weil in diesem Fall das Recyclingpapier bei der Dauerbiegezahl zumindest noch den Wert 0 erzielt (d. h. im Schnitt eine Faltung bis zum Bruch). Zur besseren Einschätzung der Werte sind in der Tabelle die flächenbezogene Masse der Papiere sowie ihr Gesamtgehalt an anorganischen Stoffen (d. h. sowohl aus dem Strich als auch aus dem Füllstoff) als „Asche“ angegeben.

Im Schnitt verliert das Bibeldruckpapier mit 6 % am wenigsten von seinen Festigkeiten, bei der Dauerbiegezahl gewinnt es sogar hinzu! Dicht gefolgt ist das Papier vom Hadernpapier, welches nur 7 % seiner Festigkeiten verliert. Beide Papiere erweisen sich als mechanisch äußerst alterungsstabil.

Das nächstbeste Papier ist das ISO 9706-konforme Büropapier mit etwa 18 % durchschnittlichem Verlust und damit immer noch in einem guten Bereich. Es folgt das holzhaltig gestrichene Papier mit einem Durchschnittsverlust von 29 %, was nicht mehr weit vom Inkjetpapier und holzfrei gestrichen (beide um 33 %) sowie holzhaltig Naturpapier (36 %) ist.

Am schlechtesten schneidet das mit dem Blauen Engel ausgezeichnete Recyclingkopierpapier ab, welches im Schnitt 56 % seiner Eigenschaften verliert. Selbst wenn man den totalen Verlust des Dauerbiegewiderstandes herausrechnet, bleiben 41 % Verlust. Dennoch erfüllt dieses Papier auch nach 9 Monaten Alterung noch die Mindestanforderungen der Norm, ausgenommen des Dauerbiegewiderstandes, der aber auch von den anderen Papieren (Ausnahme: das Bibeldruckpapier) nicht eingehalten wird.

Das Ranking der Papiere spiegelt wider, was im Text oben schon zu lesen war. Für die später zu gebende Empfehlung eines möglichst guten Papiers sind die gefundenen Erkenntnisse eindeutig und decken sich mit den Erkenntnissen aus den Laborpapieren. Die negativen Erwartungen an die gestrichenen Papiere haben sich nicht bestätigt. Dennoch bleibt noch die Frage offen, welches Papier „gut genug“ für die zu erwartenden Anforderungen ist.

Industriepapiere, bedruckt

Die eben an den unbedruckten Proben dargestellten Messwerte wurden auch an den bedruckten Proben gemessen. Die Verläufe über die Zeitpunkte der Messungen sind ähnlich, eine Aufnahme der Diagramme in diesen Bericht würde keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringen. Alle an den unbedruckten Papieren getroffenen Aussagen wurden bestätigt.

Somit kann dieser Abschnitt des Berichtes sich auf den Einfluss der Druckverfahren und der verschiedenen verwendeten Farben konzentrieren. Dazu werden in Tabelle 6 die getesteten Papiere und Druckverfahren einander gegenübergestellt.

Laut Versuchsmatrix sind 5 Papiere zu testen. Diese finden sich in der ersten Spalte der Tabelle. Die Abkürzung hf' steht für „holzfrei“, die Abkürzung hh' für „holzhaltig“. Es kommen 6 Drucke zur Anwendung, die sich nach Verfahren und/oder Druckfarbe unterscheiden.

Die Werte der bedruckten Papiere werden denen der unbedruckten Variante gegenübergestellt. Als Alterungszeitpunkt werden die Werte nach 16 Monaten künstlicher Alterung (Druck in Alufolie verpackt) gewählt (Ausnahme: Arbeitsaufnahmevermögen beim Bedrucken mit Flüssigtoner; diese Werte liegen nicht vor, da die Papiere versehentlich bei einer anderen Messung zerstört wurden; stattdessen wird der Wert nach 12 Monaten in die Tabelle eingetragen, siehe gelb hinterlegtes Feld; der Erkenntnisverlust ist gering, da sich das Arbeitsaufnahmevermögen entsprechend dem Verlauf der anderen Varianten beim gleichen Papier zwischen 12 und 16 Monaten kaum noch ändert).

Von der Vielzahl der gemessenen Werte wurden der Durchreißwiderstand in Längsrichtung (MD), das Arbeitsaufnahmevermögen in Längsrichtung und der Weißgrad D65 mit UV ausgewählt. Der Durchreißwiderstand repräsentiert die Festigkeit des Papiers, das Arbeitsaufnahmevermögen die Flexibilität und der Weißgrad die optischen Eigenschaften. Alle drei Parameter haben sich im Verlauf der Versuchsreihen als empfindlich genug für Aussagen, dabei aber als am wenigsten volatil erwiesen.

Um die unterschiedlichen Papiere besser einschätzen zu können, sind die Tabelle 6 die absolut gemessenen Werte mit ihren Einheiten aufgeführt, nicht mehr die relativen Verläufe in Prozent wie in den meisten Diagrammen vorher. Zur besseren Einschätzung sind die flächenbezogenen Massen der Papiere und der Glührückstand bei 525 °C als „Aschegehalt“ am Rand vermerkt („Asche“ beinhaltet dann sowohl den Füllstoff im Papier als auch die Pigmente im Strich auf dem Papier). Höhere flächenbezogene Masse bedeutet höhere Festigkeit (nicht höheren Weißgrad!), höhere Asche bedeutet niedrigere Festigkeit und höheren Weißgrad.

Zum Zeitpunkt „ungealtert“ zeigt sich vor allem der Einfluss des Druckverfahrens. Am ISO 9706-konformen Kopierpapier (ISO 9706 Büro) ist zu sehen, dass das ungealterte Papier durch alle drei Druckverfahren – Trockentoner, Inkjet Tintenfarbstoff und Inkjet Pigmentfarbstoff – an Durchreißwiderstand verliert.

Beim Trockentonerverfahren wird das Papier erhitzt, damit der Toner haften kann. Dies reduziert zwar den Durchreißwiderstand weniger als die anderen Druckverfahren, allerdings senkt die Hitze das Arbeitsaufnahmevermögen und den Weißgrad noch vor der Alterung.

Die beiden Inkjet-Verfahren bringen lokal Flüssigkeit auf das Papier. Dies führt zu lokaler Quellung und später Schrumpfung, welche das Gefüge des Papiers an den lokalen Stellen des Farbauftrags leicht schädigt. Dies erklärt die Abnahme des Durchreißwiderstandes. Das Arbeitsaufnahmevermögen und der Weißgrad verändern sich kaum gegenüber dem unbedruckten, ungealterten Papier.

Tabelle 6 Vergleich Industrierapiere – Absolutwerte unbedruckt/bedruckt

Papier	Druckverfahren	Durchreißwiderstand MD in mN		Arbeitsaufnahmeverm. MD in J/g		Weißgrad D65 mit UV in %	
		ungealt.	16 M	ungealt.	16 M	ungealt.	16 M
ISO 9706 Büro 79 g/m², 26 % Asche	unbedruckt	492,3	289,3	0,67	0,37	109,7	70,7
	Trockentoner	482,5	247,1	0,51	0,28	96,0	60,5
	Inkjet A - Tinte	432,5	261,8	0,65	0,32	109,7	66,5
	Inkjet B - Pigm.	425,6	212,8	0,66	0,32	109,1	63,4
hf' gestr. 168 g/m², 48 % Asche	unbedruckt	936,5	382,5	0,36	0,18	96,9	58,2
	Offset	715,9	382,5	0,35	0,20	93,6	31,7
	Flüssigtoner	725,7	458,0	0,35	0,17	95,6	29,5
hh' gestr. 88 g/m², 43 % Asche	unbedruckt	398,2	234,4	0,42	0,24	91,0	55,0
	Tiefdruck	401,1	219,7	0,42	0,24	90,6	54,3
hh' natur 78 g/m², 22 % Asche	unbedruckt	482,5	228,9	0,51	0,19	96,0	31,3
	Offset	432,5	241,2	0,48	0,16	89,3	20,8
Bibeldruck 39 g/m², 40 % Asche	unbedruckt	139,3	99,0	0,51	0,40	89,6	70,4
	Tiefdruck	140,2	103,0	0,52	0,37	89,7	71,1

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Bürodruke die Eigenschaften des ungealterten Papiers beeinflussen. Der Unterschied ist hier jedoch nicht als kritisch einzustufen, solange nach dem Druck der Wert für den Durchreißwiderstand noch ausreichend hoch ist (d. h. über den von ISO 9706 geforderten 350 mN). Die (DIN ISO 11798) schreibt zudem vor, dass Druckverfahren ein Papier im Arbeitsaufnahmevermögen maximal um 10 % senken, im Dauerbiegewiderstand (nach Schopper) nur um 0,1 (jeweils im ungealterten Zustand).

Nach 16 Monaten Alterung zeigt sich, ob Druckverfahren und Druckfarbe den Alterungsverlauf verändert haben. Aufschlüsse bietet Tabelle 7, in der die prozentualen Unterschiede der bedruckten zu den unbedruckten Papierproben zum jeweils gleichen Alterungszeitpunkt aufgelistet sind. Ein positiver Prozentwert beschreibt eine Absenkung der Eigenschaft gegenüber dem unbedruckten Papier, ein negativer Prozentwert eine Anhebung.

Zur Beurteilung der Signifikanz der Abweichungen können die Variationskoeffizienten der Einzelmessungen herangezogen werden. Beim Durchreißwiderstand liegt dieser Wert auf einem Niveau um 5 %, beim Arbeitsaufnahmevermögen um 12 %, bei Weißgrad D65 mit UV um 2 %. Die jeweilige Verdoppelung der genannten Werte deutet auf nicht zu vernachlässigende Un-

terschiede hin, da dies einer Streubreite der doppelten Standardabweichung entspricht. Messwerte außerhalb dieses Bereich gehören nur noch mit ca. 5 % Wahrscheinlichkeit zur gleichen Grundgesamtheit.

Die prozentualen Abweichungen beim ISO 9706-konformen Büropapier verdeutlichen die eben getroffene Aussage, dass die Bürodruckverfahren unterschiedliche Eigenschaften in unterschiedlicher Weise beeinflussen und absenken können.

Auffällig ist, dass der Offsetdruck in beiden betrachteten Varianten (mit holzfrei gestrichen und holzhaltig natur, bei sehr unterschiedlichen flächenbezogenen Massen) sowohl beim Durchreißwiderstand vor der Alterung als auch beim Weißgrad nach der Alterung eine absenkende Wirkung zeigt. Das Arbeitsaufnahmevermögen wird zwar angehoben, aber nicht signifikant, sondern noch im Bereich einer Standardabweichung. Beim Offset-Druckverfahren wird das Papier an den unbedruckten Stellen mit Wasser in Kontakt gebracht. Dies kann sich auf die Gefügestärke des Papiers auswirken und sie senken, da die Fasern quellen und nach dem Trocknen wieder schrumpfen. Auch ist denkbar, dass durch die Lagerung während der Alterung dieser Effekt wieder aufgehoben wird und nach der Alterung deswegen keine signifikanten Unterschiede mehr zu erkennen sind. Der größere Verlust an Weißgrad nach der Alterung ist möglicherweise durch Zusätze in der Druckfarbe und im Feuchtwasser zu erklären, würde aber einer eigenen Versuchsreihe bedürfen

Tabelle 7 Vergleich Industripapiere – Differenz unbedruckt/bedruckt

Papier	Druckverfahren	Durchreißwiderstand MD		Arbeitsaufnahmeverm. MD		Weißgrad D65 mit UV	
		ungealt. 16 M	16 M	ungealt. 16 M	16 M	ungealt. 16 M	16 M
ISO 9706 Büro	Trockentoner	2%	15%	24%	25%	12%	14%
	Inkjet A - Tinte	12%	9%	3%	14%	0%	6%
	Inkjet B - Pigm.	14%	26%	1%	15%	1%	10%
hf' gestr.	Offset	24%	0%	1%	-12%	3%	45%
	Flüssigtoner	23%	-20%	1%	-18%	1%	49%
hh' gestr.	Tiefdruck	-1%	6%	0%	3%	0%	1%
hh' natur	Offset	10%	-5%	5%	12%	7%	34%
Bibel-druck	Tiefdruck	-1%	-4%	-3%	8%	0%	-1%

Der Flüssigtoner-Druck zeigt ähnliches Verhalten wie der Offset-Druck. Er senkt den Durchreißwiderstand vor der Alterung, hebt ihn nach der Alterung allerdings genauso stark wieder an. Ein Einfluss ist also da, kann aber keinem offensichtlichen Grund zugeordnet werden.

Wiederum auffällig ist, dass der Tiefdruck in beiden hier betrachteten Varianten (holzhaltig gestrichen und Bibeldruck) keine signifikanten Abweichungen zu den unbedruckten Papieren zeigt. Tiefdruck nutzt Toluol als Lösemittel für die Druckfarbe, nicht Wasser. Dadurch werden

die Fasern nicht gezwungen, sich einem Quell- und Schrumpfzyklus zu unterziehen. Dies mag der Grund für die geringe Beeinflussung sein.

Als Fazit ist zu ziehen, dass Druckverfahren und Druckfarben auf das Papier einwirken und seine Eigenschaften verändern, meist ins Negative. Allerdings kann diesem Umstand entgegengetreten werden, indem man die Sollwerte für die unbedruckten Papiere um den Prozentsatz nach oben setzt, den man an Einbuße aus dem Druckverfahren erwartet. Die größte Veränderung findet sich zudem im Weißgrad mit UV. Das liegt zum großen Teil auch am Messverfahren, welches um eine Schwerpunktwellenlänge von 457 nm arbeitet. Driftet der Farbort des Papiers aus diesem Bereich, dann sinkt der Weißgrad sehr stark, aber die Helligkeit des Papiers (die später noch betrachtet wird) kann trotzdem noch hoch genug sein, um einen guten Kontrast zu ermöglichen.

Dier hier gezeigten Ergebnisse lassen jedoch nicht den Schluss zu, dass von einem bestimmten Druckverfahren abgeraten werden muss. Scheinbar kann man zum Tiefdruck raten, da dieser die wenigsten Veränderungen bei den mechanischen Eigenschaften hervorruft. Tiefdruck ist aber ein teures Druckverfahren, welches bei hohen Qualitätsanforderungen und üblicherweise hohen Auflagen zur Anwendung kommt. Eine weitere Bewertung findet später im Kapitel zur begründeten Empfehlung eines Systems „Papier – Schreib-/Druckstoff“ statt.

Sondersorten und Sondermessungen

Bei den Sondermessungen geht es um die Auswirkung der Alterung auf Kugelschreiber, Stempel, Korrekturflüssigkeit etc. Dies betrifft nur optische Aspekte und wird entsprechend unter den optischen Messungen abgehandelt.

Bei den hier noch mechanisch vermessenen Papieren handelt es sich um Transparentpapier und Blaupause. Derartige Papiere sind heute nicht mehr üblich, dürften sich aber noch in den Archiven aus früheren Jahren finden. Die Messungen sollen zeigen, ob mit größeren Schäden zu rechnen ist oder ob Handlungsbedarf besteht.

Da das BASE keine originalen Materialien zur Verfügung stellen konnte, wurde mit freundlicher Unterstützung des Architekturbüros Hix in Groß-Zimmern auf Unterlagen aus dem Jahr 1991 zurückgegriffen. Das Datum ergibt sich, da es auf den Zeichnungen vermerkt ist. Die Papiere wurden Ende 2022 vermessen, waren zu dem Zeitpunkt also über 30 Jahre natürlich gealtert. Im Anschluss wurden sie 12 Tage bei 80 °C/65 % Luftfeuchte gemäß ISO 20494 gealtert und nachmals vermessen. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8 Sondersorten – Eigenschaften Transparent und Blaupause

Papier Zustand Proben-ID	Transparentpapier		Blaupause	
	von 1991	12 T	von 1991	12 T
	383	386	384	387
Durchreißwiderstand MD in mN	329,5	317,7	462,1	495,2
Durchreißwid. MD, Index in $\text{mN}\cdot\text{m}^2/\text{g}$	2,8	2,7	6,0	6,6
Dauerbiegezahl MD	1,5	0,6	1,9	1,8
ZeroSpan MD in PSI	32,7	35,0	35,0	35,4
Bruchdehnung MD in %	2,1	1,4	1,7	1,7
Reißlänge MD in km	6,3	5,1	6,2	6,3
Arbeitsaufnahmeverm. MD in J/g	1,0	0,5	0,7	0,7
L* mit UV	55,5	40,5	90,6	91,6
a* mit UV	2,5	5,4	2,8	2,2
b* mit UV	11,1	15,3	-14,7	-8,3
Opazität in %	51,1	63,9	94,0	94,0
k in m^2/kg	1,8	3,4	1,9	1,6
s in m^2/kg	1,5	1,1	50,5	52,4

Beide Papiere machen einen guten Eindruck, man hat keine Befürchtung, das Papier könne zerreißen. Die Zeichnungen sind gut zu erkennen, bei der Blaupause ist der Hintergrund schon abgedunkelt. Man erkennt durch die zusätzliche Alterung über zwölf Tage keine gravierenden Veränderungen mehr, außer bei der Bruchdehnung.

Um eine Idee zu bekommen, ob die Papiere optisch altern, werden beide Papiere über einem Blattstapel von holzfreiem Kopierpapier gemessen (da nicht genügend Papier vorhanden war, um aus jedem der Papiere einen lichtundurchlässigen Stapel zu bilden). Von den gemessenen optischen Werten L*, a*, b* Opazität, Absorptionsvermögen k und Streuvermögen s zeigt nur die Helligkeit L* des Transparentpapiers einen Abfall, d. h. das Papier verdunkelt sich. Dies ist bei einem Verlust von ca. 15 Helligkeitspunkten allerdings signifikant. Entsprechend erhöht sich die Opazität. Mit einer optischen Alterung von Transparentpapier ist also selbst nach dreißig Jahren Alterung noch zu rechnen. Die Blaupause verhält sich, entgegen den oben im Text geäußerten Befürchtungen, unauffällig.

Ein besonderes Papier, welches im Rahmen von Labest vermessen wird, ist die Sondersorte „Signa Set rot 170 g/m²“ der Firma Steinbeis. Dieses Papier befindet sich im privaten Besitz des Autors dieser Zeilen, wurde nicht sachgemäß gelagert, sondern in Garagen und Kellern. Es hat somit jahreszeitliche Zyklen durchlaufen und zudem einige Umzüge erlebt.

Tabelle 9 Sondersorten – Eigenschaften Signa Set rot, 170 g/m²

Signaset rot, 170 g/m ² Proben-ID	ungealtert	> 20 J gealt.	plus 12 T gealtert
	Sollwert	382 MW	385 MW
Durchreißwiderstand MD in mN		886,5	917,9
Durchreißwid.MD , Index in mN*m ² /g		5,2	5,5
Durchreißf. Brecht-Imset in mNm/m	1500 ± 250	1900	-
Dauerbiegezahl MD (K.-Mohlin)		1,4	1,3
Dauerbiegezahl MD (Schopper)	2,1; > 1,8	2,0	
ZeroSpan MD in PSI		57,5	49,3
Bruchdehnung MD in %		2,0	1,8
Reißlänge MD in km	5,0 ± 0,5	4,8	4,6
Arbeitsaufnahmeverm. MD in J/g		0,6	0,5
L* mit UV	62,7 ± 1,2	61,8	61,6
a* mit UV	56,3 ± 1,3	55,2	52,6
b* mit UV	21,6 ± 1,3	20,7	22,5
Opazität in %		100,3	99,8
k in m ² /kg		8,3	9,0
s in m ² /kg		11,3	12,0

Das Papier ist aus Recyclingfasern hergestellt und mit nicht lichtechten Farbstoffen gefärbt worden. Die Lichtechtheit auf der Wollskala liegt bei 1 bis 2 (d. h. im Sommer im Freien verblasst die Farbe schon nach wenigen Tagen).

Das Besondere ist, dass zwar keine Messwerte von vor 20 Jahren an diesem Papier vorliegen. Aber die Sollwerte für die Fertigung existieren noch. Diese sind in Tabelle 9 mit aufgeführt. Man sieht, dass sogar der Farbort L*, a* und b* noch den Sollwerten entspricht. Da damals nicht der Durchreißwiderstand nach Elmendorf (wie im Projekt „Labest Papier“) sondern die Durchreißfestigkeit nach Brecht-Imset gemessen wurde, ist diese für den direkten Vergleich nachgemessen worden. Auch die Dauerbiegezahl wurde bei Steinbeis nicht nach Köhler-Mohlin wie im Projekt sondern nach Schopper gemessen. Die letztere Methode für zu höheren Messwerten. Sogar bei diesem empfindlichen Messwert hält das Papier die Sollwerte noch. Eine zusätzliche Alterung von 12 Tagen ändert nur wenig an den Werten. Dieses Recyclingpapier kann als Beispiel dienen, dass bei einer natürlichen Alterung über ca. 20 Jahre noch keine Einbußen erwartet werden müssen. Zu beachten ist allerdings, dass dieses Papier schon mit Neutralfarweise hergestellt wurde und Calciumcarbonat als Alkalireserve enthält.

4.4.2 Auswertung der optischen Veränderungen durch künstliche Alterung

Bei den optischen Parametern ist zu unterscheiden zwischen denen, bei denen ein Abfall bzw. ein Anstieg infolge Alterung zu erkennen ist (dies wären Weißgrad, Opazität und Helligkeit L*) und denen, die eine Verschiebung beschreiben (dies wären die Farbkoordinaten L*, a* und b* sowie der Absorptionskoeffizient k und der Streukoeffizient s). Die Helligkeit L* gehört in beide

Kategorien. Nimmt infolge Alterung der Weißgrad des Papiers ab, so sinkt automatisch auch die Helligkeit. Andererseits ist L^* ein Teil der Farbvektors, d. h. alle drei Werte L^* , a^* und b^* bestimmen den Farbort.

Ändert sich ein Farbton infolge Alterung, so zeigt sich dies in den Werten a^* und b^* . Findet z. B. durch Vergilbung eine Verschiebung in Gelbrichtung statt, dann steigt der b^* -Wert (Farbachse Gelb-Blau). Dadurch muss die Probe noch nicht Gelb aussehen, aber die Farbkoordinaten haben sich von Blau in Richtung Gelb verschoben. Analog gilt dies für den a^* -Wert und die Farbachse Rot-Grün. Daher sind für a^* und b^* Absolutwerte interessant, Prozentwerte sind nicht aussagekräftig.

Gleiches gilt für s und k . Die Änderungen der Werte können sehr groß sein. Eine Gesamtaussage ist aber nur in Kombination mit beide Werten zu treffen, wozu man die Absolutzahlen betrachten muss. In den folgenden Abbildungen werden der Weißgrad und die Opazität gemeinsam als Balkendiagramm dargestellt. Dies ist eine gute Möglichkeit, das Voranschreiten der Alterung anschaulich zu machen. Auch mit dem L^* -Wert wäre dies möglich, aber es gibt keinen Aussagegewinn, da der Verlauf dem des Weißgrades gleicht. Die anderen Parameter werden in absoluten Zahlen dargestellt und bewertet.

Laborpapiere

Da Opazität und Weißgrad in einer ähnlichen Größenordnung liegen, kann hier auf die Normierung verzichtet werden. Beide Werte werden in Prozent angegeben. 100 % Weißgrad bedeutet vollständige Reflexion des im sichtbaren Bereich eingestrahlt Lichts, 100 % Opazität bedeutet vollständige Undurchsichtigkeit des Laborblattes. Ausgewählt werden die in Alufolie verpackten Proben, da diese Variante auch bei den Industripapieren verwendet wird und somit ein direkter Vergleich möglich ist.

Abbildung 34 zeigt den Verlauf bei Linters. Es handelt sich um eine weißes Laborblatt, der Weißgrad startet daher recht hoch bei knapp unter 90. Gemessen wurde zwar mit UV-Anteil, da aber kein optischer Aufheller eingesetzt wurde, zeigen sich keine Effekte.

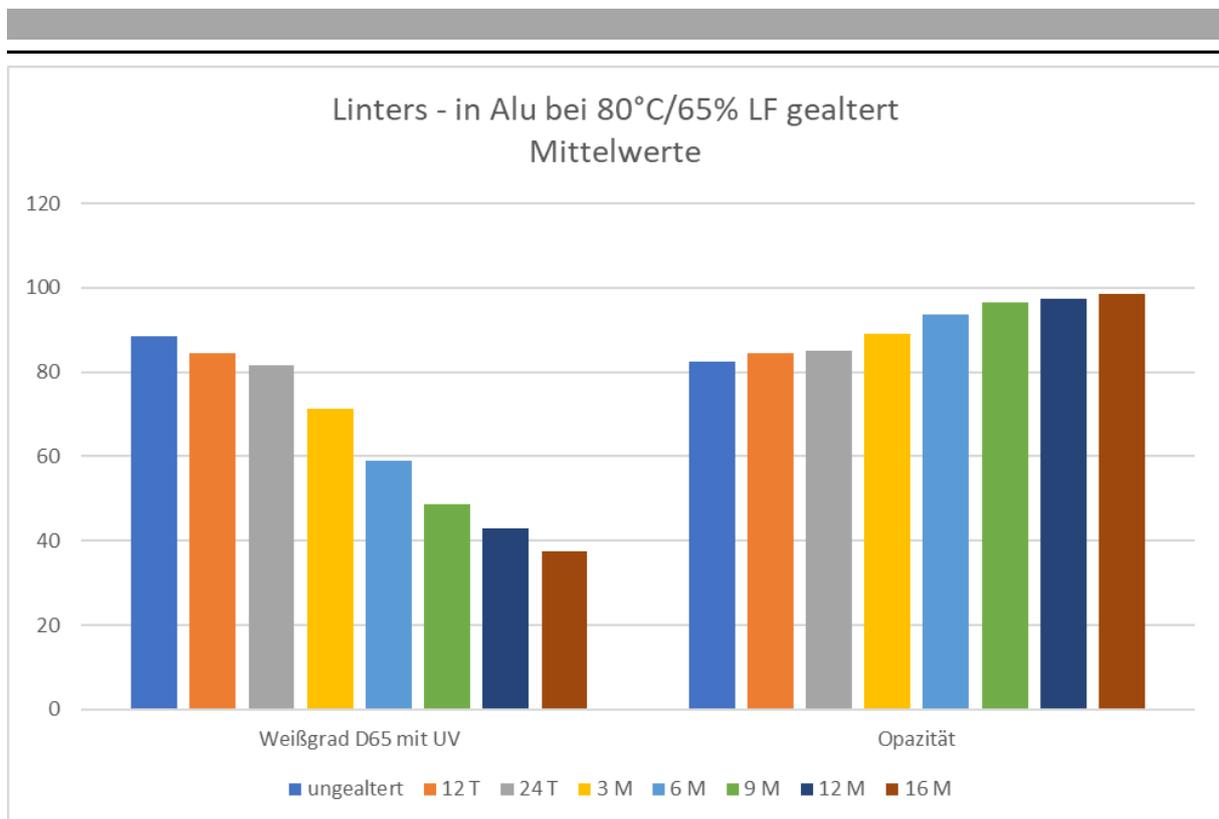


Abbildung 34 Linters – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung

Der Weißgrad nimmt ständig ab, auch schon nach nur 12 Tagen Alterung, bei der die mechanischen Eigenschaften teilweise noch ansteigen. Beachtenswert ist, wie stark die Kenngröße abfällt. Sie sinkt auf Werte unter 50 %, das ist weniger als, ein marktübliches, unbedrucktes Zeitungsdruckpapier zum Verkaufszeitpunkt hat (um 60 %).

Die Opazität startet dafür bei einem vergleichsweise niedrigen Wert knapp über 80 % und steigt bis an die 100 % heran, d. h. das Laborblatt wird zunehmend undurchsichtiger. Der niedrige Startwert ist für Papiere aus Cellulose üblich, zumal im Laborblatt nur wenige Calciumcarbonat (ca. 3,2 %) enthalten ist.

Füllstoff hebt den Weißgrad und die Opazität, altert aber nicht wie die Fasern. Der Einsatz im Laborblatt war auf die Menge beschränkt, die eine von der ISO 9706 verlangte Alkalireserve sicherstellt. Der Verlauf beide Werte charakterisiert daher gut die Fasereigenschaften und wird kaum durch den Füllstoffgehalt überlagert. Als Fazit ist daraus zu ziehen, dass die Lintersfaser einer starken Alterung in den optischen Eigenschaften unterliegt. Interpretieren lässt sich dies anhand der folgenden Tabelle 10:

Tabelle 10 Linters - in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	64	66	67	68	69	70	71	72
L* mit UV in %	96,6	95,5	95,0	91,6	86,9	82,3	79,5	76,4
a* mit UV in %	-0,1	0,3	0,4	1,3	2,2	3,2	3,9	4,6
b* mit UV in %	2,3	4,2	4,8	7,3	10,4	10,9	14,5	16,1
k in m²/kg	0,2	0,3	0,3	0,9	2,4	4,4	5,8	8,1
s in m²/kg	40,1	40,2	40,2	38,9	38,2	37,0	35,4	35,2

Der Streukoeffizient s bleibt bis zum 6 Monat nur wenig verändert, dann erfolgt ein leichter Abfall. D. h. die Grenzflächen ändern sich innerhalb des Laborblattes nur wenig. Hingegen steigt der Absorptionskoeffizient k, es wird also im Laufe der Alterung das einfallende Licht immer weniger reflektiert.

Zudem verschiebt sich der Farbort b* stark ins Gelbliche. Dadurch gerät das Licht, das dennoch reflektiert wird, aus dem Blaubereich, in dem der Weißgrad gemessen wird, hinaus und verursacht einen zusätzlichen Abfall des Weißgrades. Die beiden Effekte, Gelbverschiebung und Anstieg des Absorptionskoeffizienten erklären somit den starken Abfall des Weißgrades bei Linters.

Beim Komplementärfaserstoff CTMP entspricht der in Abbildung 35 dargestellt Verlauf des Weißgrades und der Opazität ganz den Erwartungen, die sich aus der Literaturrecherche ergeben. Mit über 70 % ist der Startpunkt des Weißgrades für einen ligninhaltigen Faserstoff recht hoch, aber das ist das besondere Kennzeichen des CTMP als modernem Faserstoff. Der starke Abfall des Weißgrades war zu erwarten.

Die Opazität starten bereits mit einem Wert deutlich über 80 %, was für einen CTMP typisch ist. Zum einen beinhaltet der Faserstoff viel Feinstoff des Typs B (siehe später Tabelle 25), welcher die Opazität erhöht, zum anderen ist die Faser wegen ihrer dunkleren Färbung verglichen mit Linters per se schon undurchsichtiger.

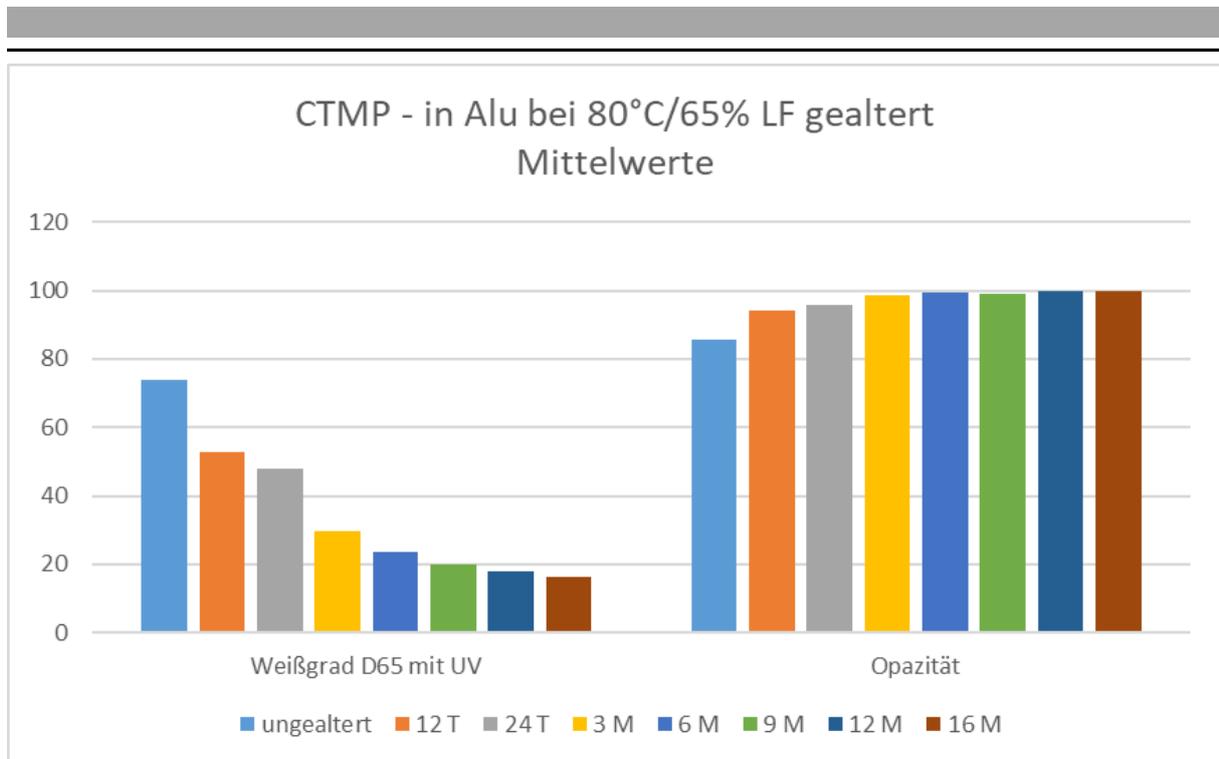


Abbildung 35 CTMP – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung

Verglichen mit Linters verschiebt sich der Farbort noch stärker in Gelbe. b^* liegt nach 6 Monaten Alterung bei 26 m^2/kg und verändert sich kaum noch, Linters liegt zu dem Zeitpunkt erst bei 12 m^2/kg (dem Ausgangswert von CTMP) und steigt noch. Diese Tatsache ist mehrfach in der Literatur für ligninhaltige Fasern beschrieben.

Verglichen mit Linters ist der k -Wert der Lichtabsorption von Anfang an höher, steigt wie bei Linters an, aber stärker. Das unterstreicht den fallenden Weißgrad und die steigende Opazität, wie oben bereits erläutert.

Anders als bei Linters sinkt der s -Wert. Dies deutet auf eine Abnahme von Grenzflächen hin. Es könnte mit den Änderungen morphologischen Eigenschaften zusammenhängen, die später noch erläutert werden. Da eine Abnahme von Feinstoff Typ B zu beobachten ist (siehe Tabelle 25), nehmen auch die Grenzflächen ab. Das senkt den Weißgrad und die Opazität. Allerdings wird die Absenkung der Opazität durch den s -Wert vom Anstieg des k -wertes überkompensiert.

Tabelle 11 CTMP - in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	117	119	120	121	122	123	124	125
L* mit UV in %	94,7	87,1	84,9	75,5	70,4	66,8	64,4	62,1
a* mit UV in %	-1,6	1,5	2,3	6,6	8,1	9,1	9,5	9,7
b* mit UV in %	11,7	17,9	18,9	25,7	26,9	27,1	27,2	26,4
k in m²/kg	0,4	2,3	3,3	8,4	14,7	14,2	16,9	18,8
s in m²/kg	40,9	39,4	40,1	34,7	37,3	27,7	26,9	25,4

Zuletzt wieder die Betrachtung des gebleichten Zellstoffs NBSK. Das Verhalten und die Werte ähneln der Lintersfaser und sind genauso zu interpretieren. Entsprechend der Versuchsmatrix wurde für diese Variante an allen Zeitpunkten getestet, was in Abbildung 36 auch dargestellt ist.

Der besseren Übersichtlichkeit wegen sind in Tabelle 12 bei Farbort und Streu- sowie Absorptionsvermögen nicht alle Zeitpunkte angegeben, obwohl die Daten vorliegen.

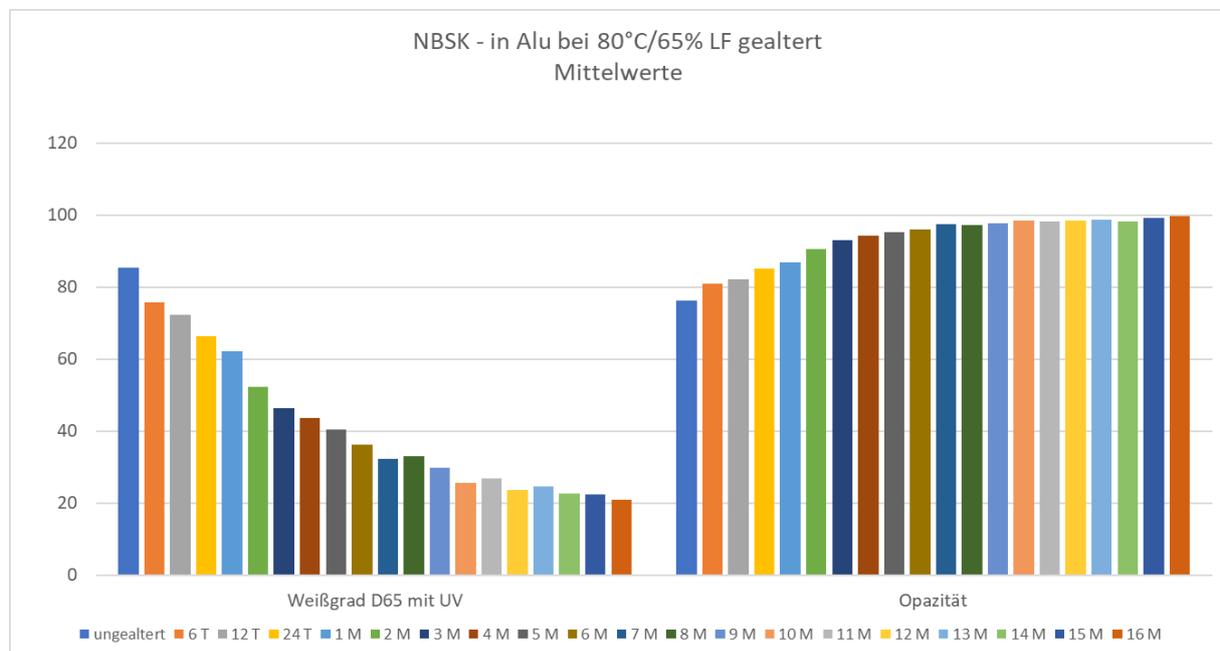


Abbildung 36 NBSK – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung

Lediglich der s-Wert hat nicht das Niveau des Linters, was sich auch im etwas geringeren Weißgrad zu Beginn der Alterungsreihe zeigt. Weniger Streuvermögen deutet auf weniger Grenzflächen hin, was sich in niedrigerer Opazität und in niedrigerem Weißgrad niederschlägt.

Tabelle 12 NBSK – in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	6 T	1 M	3 M	6 M	9 M	12 M	15 M	16 M
Proben-ID	1	3	6	8	11	14	17	20	21
L* mit UV in %	96,4	93,7	88,9	82,3	77,0	72,7	67,4	66,5	64,7
a* mit UV in %	-0,4	0,3	1,6	3,4	5,0	6,1	7,3	7,6	7,9
b* mit UV in %	4,5	7,3	10,9	15,4	18,9	20,2	21,2	21,7	21,7
k in m²/kg	0,1	0,4	1,2	37,0	5,8	8,5	11,7	13,1	27,8
s in m²/kg	29,2	29,7	28,9	28,1	27,3	26,8	23,4	23,8	17,0

Final sei bei den Laborblättern auch der Vergleich angestellt, wie sich die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen auf die Veränderung der optischen Eigenschaften auswirkt.

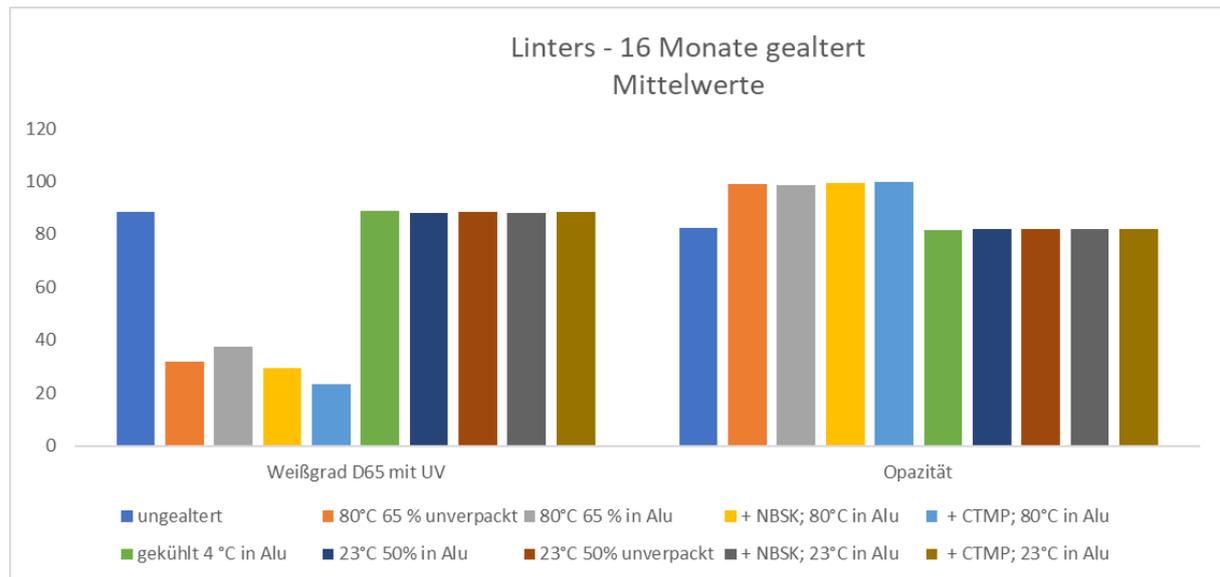


Abbildung 37 Linters – in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert

Wie in Abbildung 37 zu sehen, zeigt sich auch bei der Optik das bereits bei den mechanischen Eigenschaften festgestellte Ergebnis. Die enge Lagerung mit ligninhaltigen Fasern wirkt sich negativ auf die Alterung nicht-ligninhaltiger Fasern aus, zumindest bei den beschleunigt gealterten Varianten. Die natürlich bzw. bei 4 °C gealterten Varianten zeigen keine Abweichungen untereinander oder zum Ausgangspunkt. Dieses Ergebnis wiederholt sich bei den anderen Laborpapieren und wird daher nicht dargestellt.

Industriepapiere, unbedruckt

Begonnen wird wieder mit dem Hadernpapier, welches die Anforderungen nach ISO 9706 erfüllt. Da dieses Papier ohne optischen Aufheller hergestellt wurde, zeigen die Messwerte mit und ohne UV die gleiche Tendenz und das gleiche Niveau. Deswegen werden, analog zu den Laborpapieren, nur die Werte mit UV dargestellt. Dargestellt sind wieder Absolutwerte, wie bei den optischen Eigenschaften der Laborpapiere auch.

Wie schon vom Laborpapier aus Linters bekannt, altert auch das Hadernpapier. Die Änderung der optischen Eigenschaften fällt aber – wie schon bei den mechanischen Eigenschaften – nicht so stark aus. Auf den Füllstoffgehalt ist dies nicht zurückzuführen. Dieser liegt um 7 % Calciumcarbonat, das Laborblatt liegt um 3 %, was zwar weniger als die Hälfte ist, aber in beiden Fällen ein niedriges Niveau darstellt. Die Opazität steigt, beginnend auf einem hohen Niveau. Gegenüber den Messungen an den Laborpapieren bedeutet dies eine Bestätigung der festgestellten Tendenz und keinen neuen Erkenntnisgewinn. Das Hadernpapier zeigt sich somit auch bei den optischen Eigenschaften als sehr beständig gegen Alterung.

Die Ergebnisse der Messungen zeigt Abbildung 38, darauf folgt Tabelle 13 mit den Verläufen des Farborts und des Streu- und Adsorptionsvermögens.

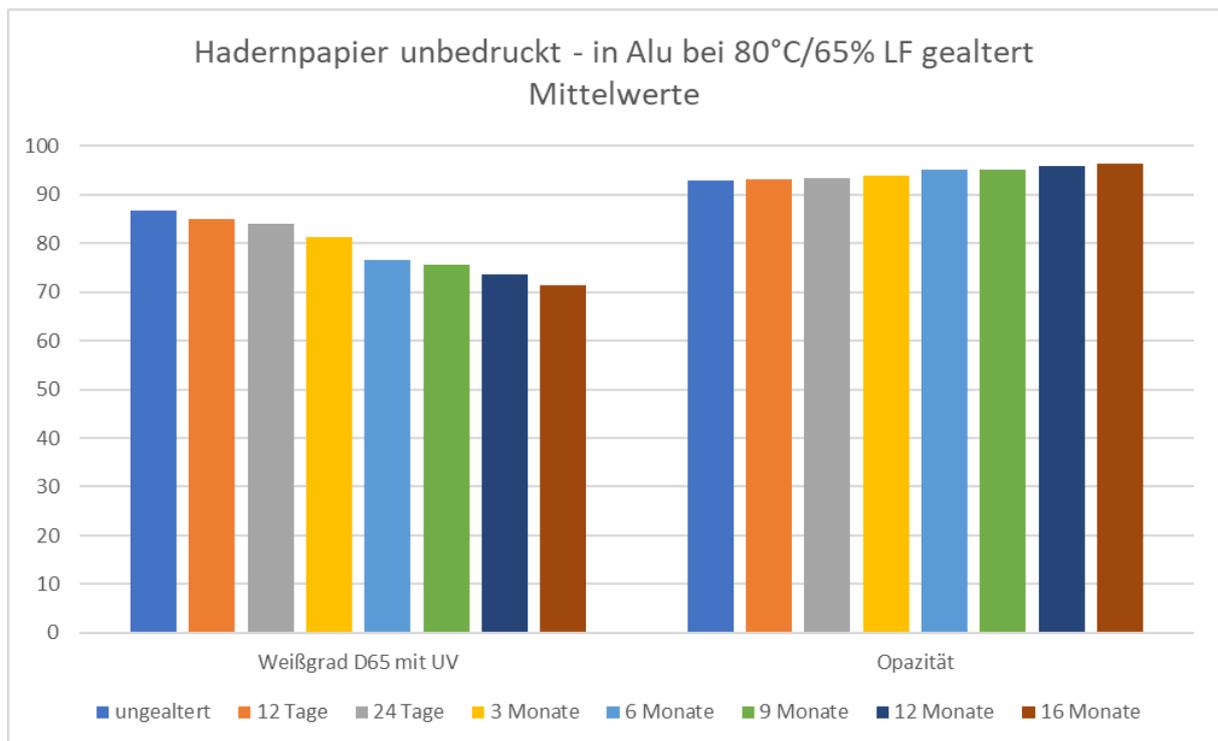


Abbildung 38 Hadernpapier – Verlauf opt. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Farbort, s und k starten auf ähnlichem Niveau wie Linters. Allerdings ändern die Werte sich beim Hadernpapier nicht, sondern bleiben sehr stabil. Das Hadernpapier zeigt sich auch hier optisch wenig alterungsanfällig.

Tabelle 13 Hadernpapier unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 Tage	24 Tage	3 Mon.	6 Mon.	9 Mon.	12 Mon.	16 Mon.
Proben-ID	203	204	205	206	207	208	209	210
L* mit UV in %	96,1	95,7	95,6	95,1	93,9	93,7	93,2	92,3
a* mit UV in %	0,2	0,3	0,3	0,4	0,7	0,8	1,0	1,3
b* mit UV in %	2,8	3,5	4,1	5,3	7,0	7,4	8,1	8,7
k in m²/kg	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,6	0,8	0,9
s in m²/kg	48,2	46,4	47,4	47,9	49,8	45,8	47,7	46,0

Das zum CTMP-Laborpapier korrespondierende Industriebüropapier ist das Recyclingkopierpapier (Abbildung 39). Der Weißgrad ist naturgemäß niedriger als beim Hadernpapier oder beim holzfrei weißen Kopierpapier (siehe weiter unten) und sinkt über die Alterungsperiode weiter ab. Allerdings schwächt der Abfall nach 6 Monaten ab, der Alterungsverlauf scheint gestoppt.

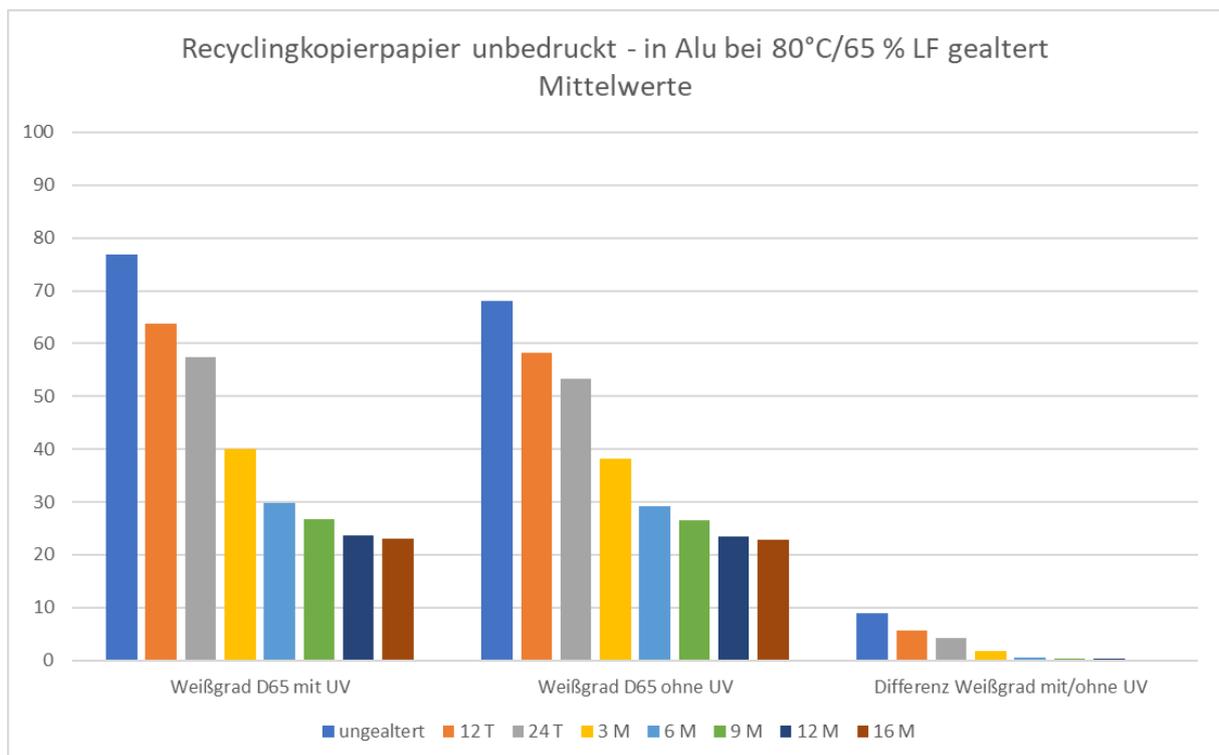


Abbildung 39 Recyclingkopierpapier – Verlauf opt. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung

Bei der Produktion von Recyclingkopierpapier, welches – wie das vorliegende Trendwhite – das Umweltzeichen „Blauer Engel“ trägt, darf gemäß den Bedingungen für den Blauen Engel nicht mit Zusatz von optischem Aufheller hergestellt werden (Vergabekriterien DE-UZ 14a). Allerdings sind die rezyklierten Fasern, aus denen das Papier besteht, mit optischem Aufheller versetzt worden. Dies findet sich im Recyclingpapier wieder. Der Weißgrad ohne UV gemessen liegt darum zu Beginn der Versuchsreihe ca. 8 Punkte niedriger.

Die Differenz nimmt im Alterungsverlauf ab und ist nach 6 Monaten Alterung kaum noch sichtbar. Der optische Aufheller scheint nun vollkommen zersetzt zu sein. Die anderen Faktoren,

welche die optischen Eigenschaften bestimmen, führen in Summe zu keiner Veränderung des Weißgrades mehr.

Dieses Verhalten ist vermutlich auf den Gehalt an Calciumcarbonat zurückzuführen, der bei ca. 20 % liegt gegen nur ca. 3 % in den Laborblättern. Bei Calciumcarbonat kann davon ausgegangen werden, dass sich seine optischen Eigenschaften kaum ändern. Schließlich es ist selbst ein Produkt, welches schon Millionen Jahre alt ist und als Kreide oder Marmor in Steinbrüchen gewonnen wurde. Dadurch stabilisiert der hohe Füllstoffgehalt die optischen Eigenschaften.

Das Recyclingkopierpapier enthält ligninhaltige Fasern, aber auch ligninfreie. Im Gegensatz zum Laborpapier aus reinem CTMP besteht es also aus einem Gemisch. Hinzu kommt noch der Gehalt an Calciumcarbonat, der die optischen Eigenschaften positiv beeinflusst. Die Tendenzen der in Abbildung 39 gezeigten Eigenschaften entspricht denen des Laborblattes, jedoch durch die Mischung auf einem etwas unterschiedlichen Niveau und die Werte ändern sich beim Industrierpapier langsamer.

Tabelle 14 Recyclingkopierpapier unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealtert	12 Tage	24 Tage	3 Mon.	6 Mon.	9 Mon.	12 Mon.	16 Mon.
Proben-ID	213	214	215	216	217	218	219	220
L* mit UV in %	89,5	86,9	85,2	78,6	73,3	71,2	68,5	68,0
a* mit UV in %	-0,1	0,1	0,5	2,9	4,9	5,7	6,7	6,9
b* mit UV in %	-0,8	6,1	9,3	16,4	21,9	22,8	23,5	23,6
k in m²/kg	2,5	3,5	4,5	10,0	12,2	16,4	18,1	16,7
s in m²/kg	57,5	54,4	54,7	55,3	40,3	44,7	38,9	34,9

Auch der Verlauf des Farborts sowie des s- und k-Wertes in Tabelle 14 gleicht dem des Laborblattes aus CTMP. Eine deutliche Änderung der Werte tritt erst ab den dritten Monat der beschleunigten Alterung ein.

Korrespondierend zum Laborpapier aus Zellstoff folgt als nächstes das Kopierpapier aus Zellstoff. Dargestellt wird Weißgrad mit und ohne UV sowie die Differenz (siehe Abbildung 40) über die volle Laufzeit mit allen Messpunkten. Da weißes Kopierpapier aus Zellstoff immer mit optischem Aufheller versetzt wird, zeigt sich hier gut dessen Wirkung. Der Weißgrad mit UV startet bei einem Wert von 110 %, ohne UV gemessen liegt das Papier bei ca. 86 %. Der optische Aufheller hebt die Weiße also um ca. 24 Prozentpunkte an. Im Laufe der Alterung sinkt diese Differenz auf ca. 5 Punkte. Wie beim Recyclingpapier sieht man, dass der optische Aufheller durch die künstliche Alterung abgebaut wird. Ab ca. 11 Monaten Alterung fallen die Werte nicht mehr durchgehend, sondern pendeln zwischen 60 und 70 Weißgradpunkten (mit UV gemessen) bzw. 55 und 63 Weißgradpunkten (ohne UV gemessen). Anscheinend findet hier die optische Alterung ihr Ende, und zwar 5 Monate später als beim Recyclingpapier. Das

Ende der Alterung wäre mit dem gegenüber dem Laborpapier aus NBSK wiederum höheren Gehalt an anorganischem Füllstoff zu erklären. Das spätere Eintreten des Endes verglichen mit dem Recyclingpapier könnte an der größeren Menge optischen Aufhellers liegen, der länger braucht, bis er zersetzt worden ist. Das Industriekopierpapier hat einen Calciumcarbonat-Anteil von ca. 26 %, im Laborpapier lag der Wert nur um 4 %. Dadurch sinkt der Weißgrad auch nicht so stark ab wie beim Laborpapier.

Zur weiteren Interpretation der Messdaten folgt der Blick auf die Farbortveränderung sowie das Absorptions- und Streuvermögen. In Tabelle 15 sieht man den Verlauf der Werte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Zeitpunkte der Messungen dargestellt, wohl aber alle Monate ab dem zwölften, um die uneinheitliche Tendenz der Messwerte in diesem Bereich zu beleuchten. Man sieht den bekannten Verlauf der Werte, wobei b^* aufgrund des optischen Aufhellers stark im Blaubereich (bei -17) beginnt und dann auf einen Wert von nur 4,3 ansteigt. Das entspricht dem Wert, den das korrespondierende Laborpapier aus NBSK zu Beginn der Alterung hatte! Erklärbar ist dies ebenfalls mit dem hohen Gehalt an Calciumcarbonat.

Die anderen Werte verändern sich zwar auch, aber deutlich weniger ausgeprägt als beim Laborblatt aus NBSK. Dies und das hohe Streuvermögen sind jeweils auf den Füllstoffanteil zurückzuführen. Auf die optischen Eigenschaften wirkt sich das Calciumcarbonat somit eindeutig positiv aus.

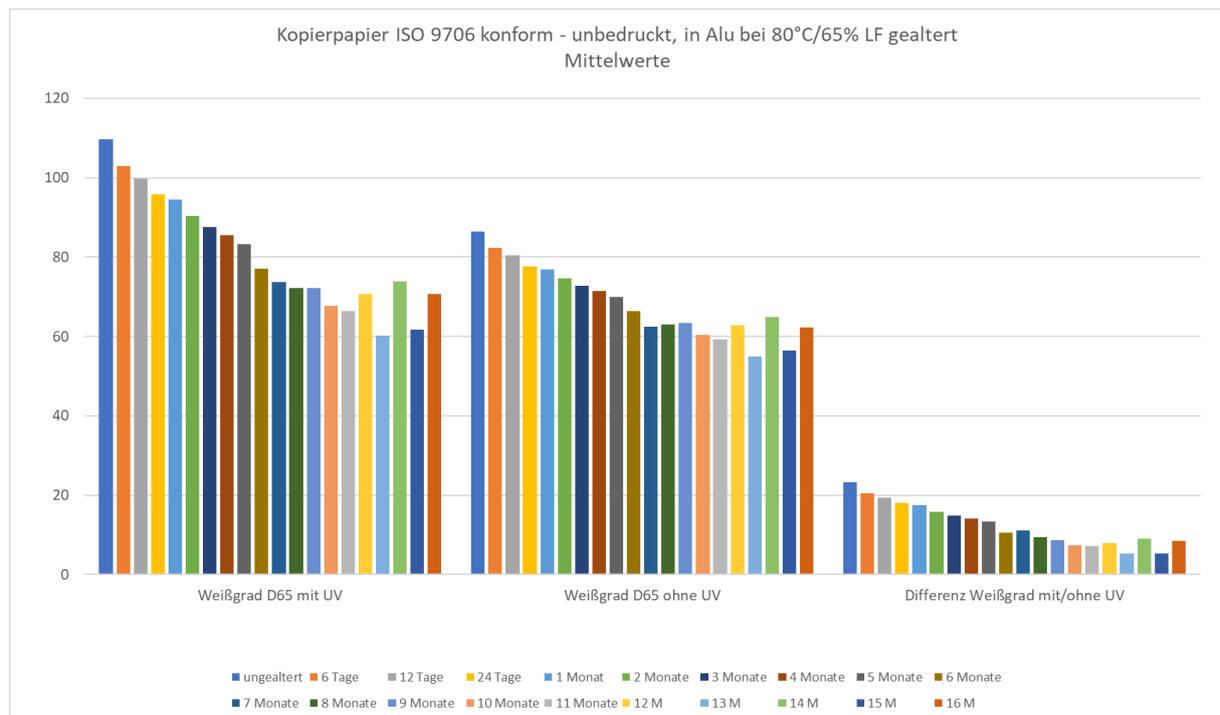


Abbildung 40 Kopierpapier ISO 9706 konform – Weißgradverlauf mit und ohne UV

Hingewiesen sei auf die Monate 14 und 16. In beiden Monaten ist der k-Wert niedriger als aus dem Verlauf der anderen Monate erwartet. Das führt zu einem hohen Weißgrad. Beim Monat 13 kommt fällt ein niedriger s-Wert auf, der sich senkend auf den Weißgrad auswirkt. Die Werte sind in sich also stimmig.

Tabelle 15 Kopierpapier holzfrei, weiß ISO 9706 konform – unbedruckt, in Alu gealtert - Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	6 T	1 M	3 M	6 M	9 M	12 M	13 M	14 M	15 M	16 M
Proben-ID	170	175	178	180	183	186	189	190	191	192	193
L* mit UV in %	93,5	93,0	92,2	91,5	90,1	89,4	89,4	86,6	90,0	87,3	89,3
a* mit UV in %	3,8	3,1	2,6	2,1	2,0	2,0	1,9	2,4	2,0	2,3	2,0
b* mit UV in %	-17,6	-14,0	-9,6	-5,6	0,2	3,2	4,3	9,1	2,7	9,0	4,3
k in m²/kg	1,3	1,4	1,7	1,9	2,4	2,6	2,9	3,5	2,4	3,8	2,6
s in m²/kg	64,0	63,8	63,9	63,1	62,7	62,0	66,4	54,6	63,1	62,4	59,9

Das gegen Ende der Alterung diese Schwankungen beobachtet werden, kann zum einen an zufälligen Schwankungen innerhalb der industriell hergestellten Blätter liegen. Es ist aber auch denkbar, dass die Alterung bei 80 °C und 65 % Luftfeuchte an ihre Grenzen stößt und ca. ab 12 Monaten Zersetzungsprozesse deutlich werden, die bei weniger drastischer Lagerung nicht eintreten würden. In der Literaturrecherche wurde dazu eine ähnliche Beobachtung bei (Zervos und Moropoulou 2005) gefunden, dort schon nach 90 bis 120 Tagen an Baumwollfasern.

In der weiteren Reihe der getesteten Industripapiere folgt das Inkjet-Papier. Auch dieses Papier ist mit optischem Aufheller versetzt, der sich durch die künstliche Alterung zersetzt. Das Verhalten ähnelt dem des ISO 9706-konformen Kopierpapiers. Der Gesamtfüllstoffgehalt liegt bei ca. 22 %, was wiederum erklärt, warum der Weißgradabfall nicht so stark ausfällt wie beim Füllstoffarmen Laborpapier. Auch scheint die optische Alterung für diesen Parameter nach 5 bis 6 Monaten gestoppt zu sein.

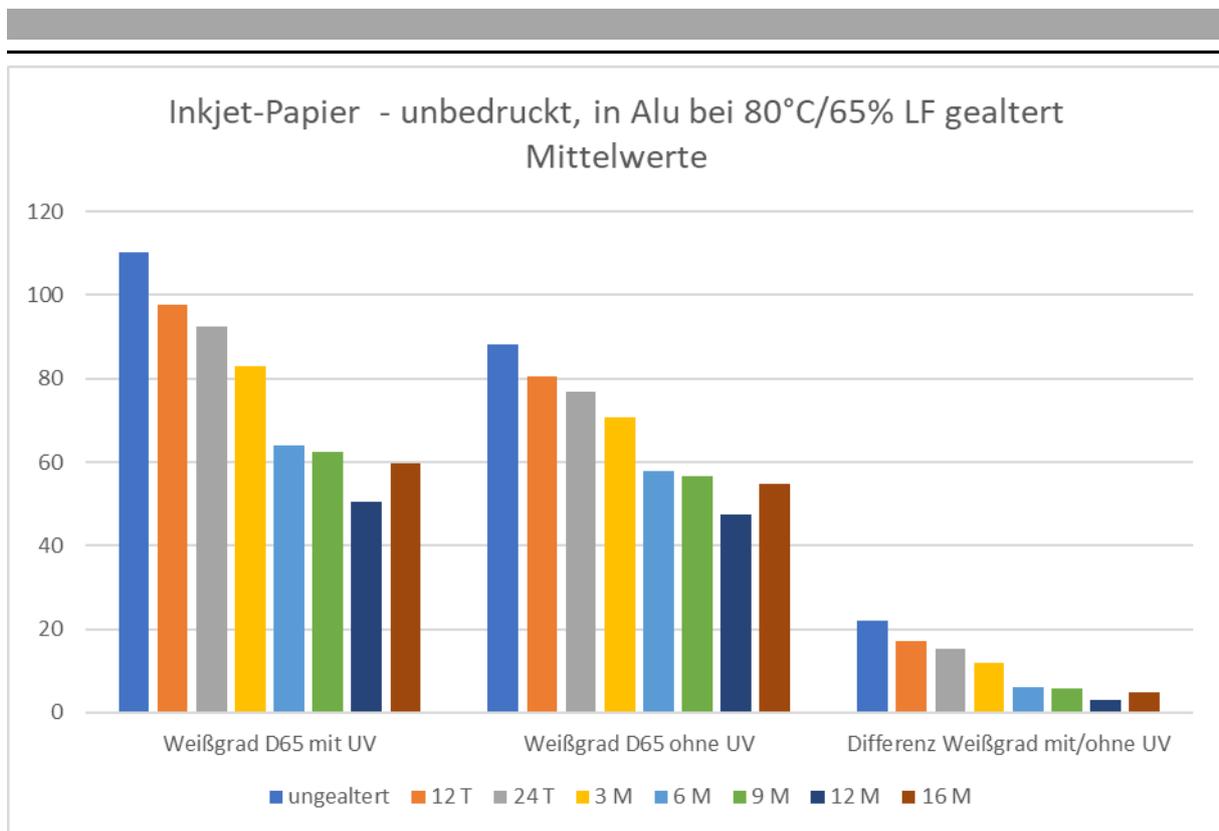


Abbildung 41 Inkjet-Papier – Weißgradverlauf mit und ohne UV

Der Blick auf die Werte des Farbvektors und des Adsorptions- und Streuvermögens offenbaren keine neuen Erkenntnisse gegenüber dem ISO-konformen Kopierpapier (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16 Inkjet-Papier - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	223	224	225	226	227	228	229	230
L* mit UV in %	94,1	93,2	92,5	91,3	87,8	87,5	83,9	87,0
a* mit UV in %	3,1	1,8	1,6	1,5	2,0	2,2	3,3	2,7
b* mit UV in %	-15,8	-9,9	66,0	-2,1	7,5	8,4	13,9	10,3
k in m²/kg	1,0	1,2	1,4	1,8	3,1	3,3	5,3	4,9
s in m²/kg	58,8	58,9	59,2	59,4	56,3	55,8	53,7	60

Das ebenfalls holzfreie weiße, gestrichene Papier verhält sich analog zu den vorherigen Papieren (Abbildung 42). Die Wirkung des optischen Aufhellers ist nicht so hoch. Dies liegt daran, dass optischer Aufheller vornehmlich auf Cellulose aufzieht. Beim gestrichenen Papier ist aber eine Schicht aus anorganischen Pigmenten auf der Oberfläche des Papiers. Diese deckt die Cellulosefasern ab. Optischer Aufheller im Strich wirkt weniger gut als auf den Papierfasern, die zu Beginn der Versuchsreihe erreichte Differenz von ca. 10 Punkten stellt derzeit das technologisch sinnvoll Machbare dar.

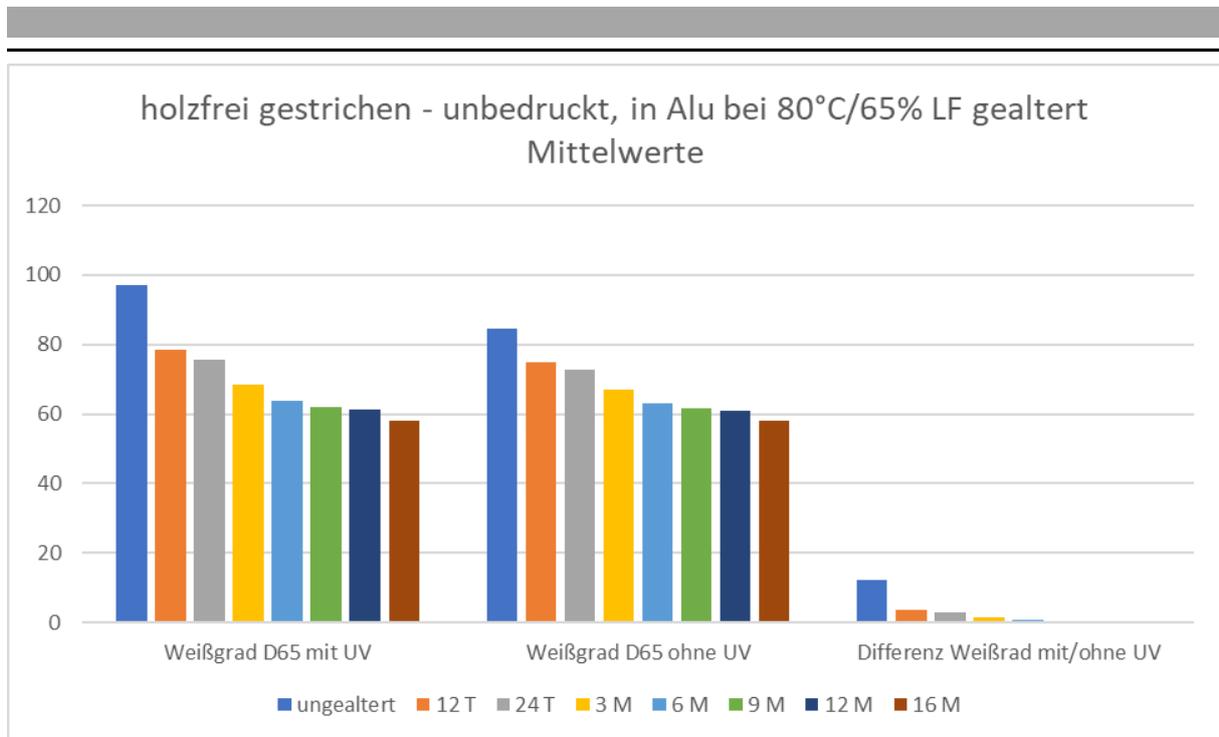


Abbildung 42 holzfrei gestrichen – Weißgradverlauf mit und ohne UV

Auch hier ist nach 5 bis 6 Monaten der Abfall an Weißgrad vernachlässigbar. Der Gesamtanteil an anorganischen Pigmenten liegt bei ca. 48 %, wobei es sich im vorliegenden Papier fast ausschließlich um Calciumcarbonat handelt. Die hohe Zahl erklärt sich daraus, dass bei diesem Papier Calciumcarbonat sowohl in das Innere der Fasermatrix (Füllstoff) als auch als Beschichtung auf die Oberfläche (Strich) appliziert wurde. Wie bei den anderen Papieren auch wirkt dieser Zusatz stabilisierend auf den Weißgrad. Die Bindemittel, die die Strichpigmente auf der Paperoberfläche fixieren sollen, zeigen keine auffälligen Alterungserscheinungen.

Hinsichtlich der in Kombination zu betrachtenden Parameter L, a* und b* sowie s und k sei die Aufmerksamkeit auf den s-Wert gelenkt (Tabelle 17). Nach 6 Monate Alterung zeigt sich ein leichter Anstieg des Streuvermögens. Dieser kompensiert teilweise den Anstieg des k-Wertes und gleich so den dadurch eintretenden Weißeverlust etwas aus.

Tabelle 17 holzfrei gestrichen - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	233	234	235	236	237	238	239	240
L* mit UV in %	93,9	91,9	91,4	89,8	88,3	87,8	87,4	86,3
a* mit UV in %	1,6	-0,1	0,0	0,5	0,8	1,0	0,9	1,2
b* mit UV in %	-8,7	2,1	3,6	6,8	8,4	9,0	9,4	10,3
k in m²/kg	0,6	1,0	1,1	1,6	2,2	2,5	2,5	3,0
s in m²/kg	42,6	41,9	42,1	42,6	44,6	45,9	44,4	43,6

Gestrichen, aber holzhaltig stellen sich bei den betrachteten optischen Eigenschaften wie in Abbildung 43 zu sehen dar.

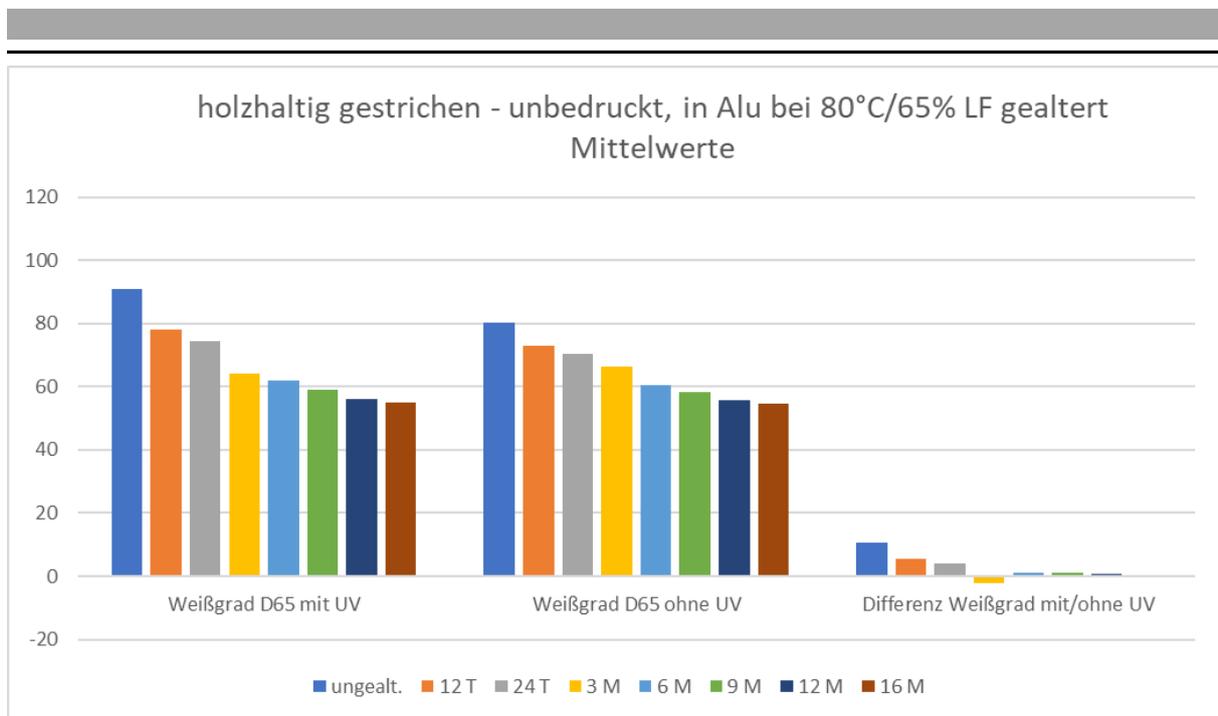


Abbildung 43 holzhaltig gestrichen – Weißgradverlauf mit und ohne UV

Auch hier ist der Weißegewinn durch optischen Aufheller infolge des Strichs nur ca. 10 Weißpunkte. Das Weißgradniveau ist niedriger als beim holzfrei gestrichenen Papier, was an den ligninhaltigen, dunkleren Fasern liegt. Der optische Verlauf ist ansonsten sehr ähnlich.

Tabelle 18 unterscheidet sich insofern von holzfrei gestrichenem Papier, als nicht der Streuwert sich nach 6 Monaten verändert, sondern der a^* -Wert, d. h. das Papier wird leicht ins rötliche verschoben. Diese Veränderung ist nicht gravierend, man könnte die a^* -Verschiebung allein nicht sehen, aber man kann sie messen. Vor dem Hintergrund der deutlich auch mit bloßem Auge zu erkennenden blau-gelb-Verschiebung des b^* -Wertes, die bei allen Papieren auftritt, fällt dies optisch nicht ins Gewicht. Dennoch tritt der Zeitpunkt von 6 Monaten wieder als auffällig hervor.

Das holzhaltig gestrichene Papier liegt mit 43 % Gesamtanteil an anorganischen Pigmenten auf dem Niveau des holzfrei gestrichenen. Allerdings bestehen Strich und Füllstoff nicht nur aus Calciumcarbonat, sondern haben noch einen Kaolinanteil von ca. 5 %. Kaolin wird im Strich zugesetzt, um den Glanz des Papiers zu erhöhen. Es wirkt sich erhöhend auf den s - und k -Wert aus, die bei gestrichenen Papieren sowieso stark vom Strich und wenig vom Fasernetzwerk beeinflusst sind.

Tabelle 18 holzhaltig gestrichen - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	253	254	255	256	257	258	259	260
L* mit UV in %	92,4	90,9	90,1	87,8	86,1	85,0	83,8	83,3
a* mit UV in %	0,7	0,0	0,2	0,7	1,8	2,2	2,7	2,7
b* mit UV in %	-6,6	0,6	2,2	7,2	6,3	6,9	7,7	7,8
k in m²/kg	1,1	1,6	1,8	2,6	3,6	4,2	5,1	5,6
s in m²/kg	47,9	49,4	49,2	49,6	49,4	50,2	51,0	52,0

Von den gestrichenen Papieren geht es in der Betrachtung wieder zurück zu den ungestrichenen. Es folgt das holzhaltige Naturpapier (Abbildung 44).

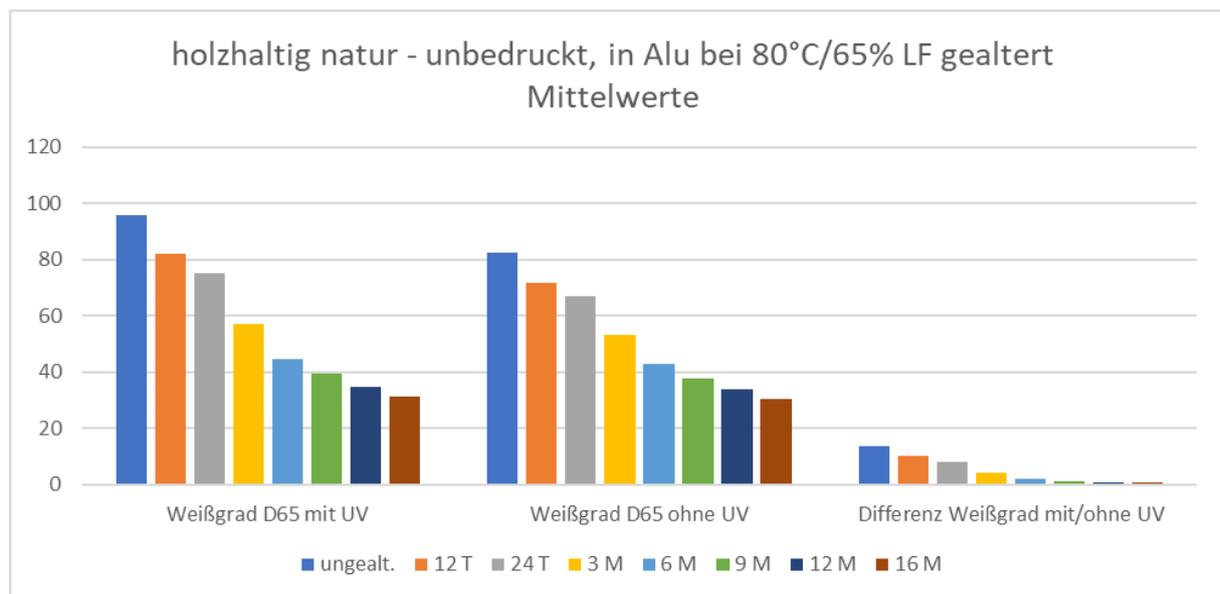


Abbildung 44 holzhaltig natur (ungestrichen) – Weißgradverlauf mit und ohne UV

Das Papier ist recht weiß, da es nicht nur aus ligninhaltigen Fasern besteht. Wegen des Gehalts an Lignin geht aber der Weißgrad sehr stark zurück, stärker als bei holzfreien, aber auch stärker als beim holzhaltig gestrichenen Papier. Bei letzterem schützt die Strichschicht vor der Vergilbung und der direkten Einwirkung des Lichts. Der Füllstoffgehalt von ca. 22 % liegt im Bereich des Recyclingpapiers (20 %). Das holzhaltige Frischfaserpapier weist auch im Verlauf der Alterung ständig etwas höhere Werte als das holzhaltige Recyclingpapier auf. Dies liegt daran, dass im Recyclingpapier Druckfarbenreste vorhanden sind, die sich auf die optischen Messwerte auswirken.

Der Weißegewinn durch optischen Aufheller liegt vor der Alterung bei ca. 14 Weißpunkten, also höher als bei den gestrichenen, aber niedriger als beim ungestrichen holzfreien Papier. Die Erklärung liegt im Aufziehen des optischen Aufhellers primär auf Cellulosefasern, nicht auf Ligninhaltige Fasern. Der Verlauf ist ansonsten wie bei den anderen Papieren auch und zeigt keine unerwarteten Abweichungen.

Tabelle 19 zeigt den Verlauf der weiteren optischen Parameter. Auch hier sind keine Auffälligkeiten zu verzeichnen, das Papier ähnelt dem Recyclingkopierpapier und bestätigt die dort gefundenen Erkenntnisse.

Tabelle 19 holzhaltig natur (ungestrichen) - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	263	264	265	266	267	268	269	270
L* mit UV in %	95,2	92,9	91,5	86,7	82,1	79,7	77,2	75,0
a* mit UV in %	1,1	1,1	1,2	2,1	3,3	4,0	4,7	5,4
b* mit UV in %	-5,3	1,1	4,1	12,1	17,4	20,1	21,6	22,8
k in m²/kg	0,5	1,0	1,4	3,2	5,2	7,3	8,8	10,4
s in m²/kg	52,8	52,0	51,6	49,1	42,4	45,6	42,3	40,4

Zuletzt sei noch das Bibeldruckpapier betrachtet. Da dieses ohne optischen Aufheller hergestellt wurde, sind die Weißgradmesswerte mit und ohne UV gleich, eine Differenzbetrachtung erübrigt sich. Stattdessen wird in Abbildung 45 zusätzlich zum Weißgrad einmal der Verlauf des L*-Wertes dargestellt, der sonst nur den Tabellen entnommen werden kann.

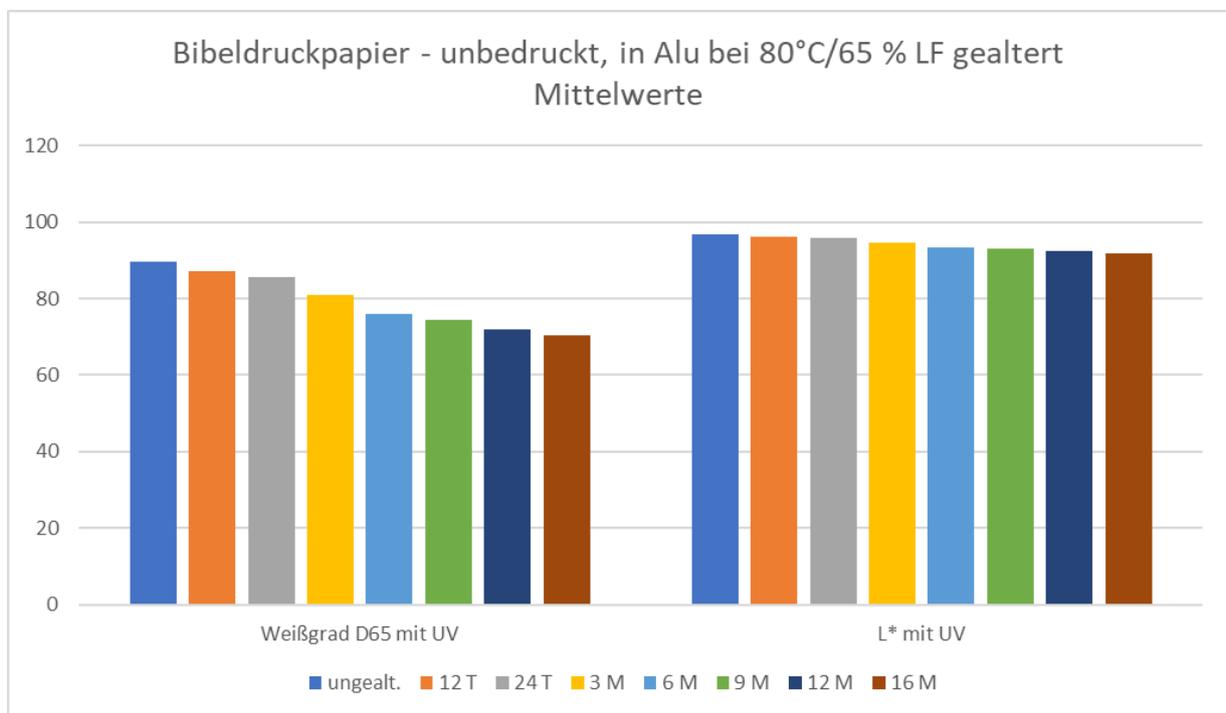


Abbildung 45 Bibeldruckpapier – Weißgrad- und Verlauf der Helligkeit L*

Der L*-Wert sinkt ähnlich dem Weißgrad. Allerdings beschreibt dieser Wert die Helligkeit unabhängig von der Farbe, während der Weißgrad einen Wert darstellt, der im Wellenlängenbereich um 457 nm gemessen wurde. Verschiebt sich der Farbort des Papiers aus diesem Wellenlängenbereich hinaus, kann der Weißgrad sehr niedrige Werte annehmen, wie in diesem Kapitel häufig zu sehen. Das bedeutet aber nicht, dass das Papier jetzt sehr dunkel wird. Es

kann noch hell sein, aber eben gelblich und dadurch aus dem Messbereich herausgewandert. Dies ist wichtig zu wissen, da der Terminus „Weißgrad“ impliziert, ein nicht weißes Papier sei nicht mehr hell. Das kann es aber durchaus noch sein, was dann am L*-Wert erkennbar ist. Auf diesen Punkt wird später nochmals bei der Betrachtung der bedruckten Papiere eingegangen.

Auch in den optischen Eigenschaften zeigt sich das Bibeldruckpapier als das alterungsresistenteste. Der Weißgrad fällt zwar ab, aber es bleibt nach den Alterungszyklen deutlich mehr Restweißgrad übrig als bei den anderen Papieren. Der Grund dafür ist im verwendeten Füllstoffgemisch zu sehen. Während die anderen Industripapiere im Wesentlichen Calciumcarbonat als Füllstoff beinhalten, findet sich im Bibeldruck mit ca. 7 % ein nennenswerter Anteil des Füllstoffs Titandioxid.

Dieser Füllstoff macht speziell beim dünnen Bibeldruckpapier Sinn, welches sonst keine ausreichende Opazität hätte. Eine bedruckte Rückseite wäre dann auf der Vorderseite lesbar, weil durchscheinend. Titandioxid ist ein Füllstoff mit einem sehr hohen Streuvermögen. Entsprechend findet man in Tabelle 20 einen Wert von über 100 m²/kg, ca. doppelt so hoch wie bei den anderen Papieren. Da Bibeldruckpapier aus stark gemahlene Fasern besteht (wie bei den mechanischen Eigenschaften schon erläutert), gemahlene Fasern aber ein geringes Streuvermögen besitzen, zeigt sich doppelt, welchen wichtigen Einfluss das Titandioxid bei diesem Papier spielt.

Tabelle 20 Bibeldruckpapier - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k

	ungealt.	12 T	24 T	3 M	6 M	9 M	12 M	16 M
Proben-ID	243	244	245	246	247	248	249	250
L* mit UV in %	96,7	96,2	95,9	94,8	93,5	93,0	92,4	91,9
a* mit UV in %	-0,3	-0,2	-0,1	0,2	0,6	0,7	1,0	1,1
b* mit UV in %	1,7	2,7	3,3	5,0	6,6	7,3	8,2	8,8
k in m²/kg	0,4	0,5	0,6	0,9	1,3	1,7	2,0	2,2
s in m²/kg	102,3	105,5	106,2	105,1	100,7	103,0	103,5	101,5

Industriepapiere, bedruckt

Das optische Verhalten der bedruckten Papiere wurde bereits weiter oben anhand Tabelle 6 Vergleich Industriepapiere – Absolutwerte unbedruckt/bedruckt erläutert und braucht hier nicht wiederholt zu werden.

Interessanter ist an dieser Stelle das Verhalten der Druckfarben. Die Information soll erhalten bleiben, daher dürfen die Farben nicht ausbleichen und sollen einen Mindestkontrast gegenüber dem Papier bewahren. Das Ausbleichen der Farben selbst lässt sich vermeiden, wenn lichtechte Farben eingesetzt werden, wie von DIN ISO 11798 gefordert. Zum Mindestkontrast gibt es verschiedene Anforderungen, wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die DIN ISO 11798

(Version von 2001; die ISO befindet sich aktuell unter Revision) schreibt eine Mindestdichte von 0,3 vor, die DIN 32975 schreibt für die Barrierefreiheit im öffentlichen Raum 0,4 vor, die DIN 1450 schreibt für die „zweifelsfreie Leserlichkeit von Schriften“ sogar 0,7 vor.

Kontrast ist ein optischer Unterschied, der vom Auge erkannt wird. Der CIE-L*a*b*-Farbraum ist so aufgebaut, dass rechnerisch gleiche Farbabstände von durchschnittlichen Personen auch als gleich unterschiedlich wahrgenommen werden. Somit kann das Delta zwischen Farbvektoren als Maß für den erkennbaren Unterschied und damit für den Kontrast herangezogen werden.

Zwar ist das Empfinden des Farbabstandes linear abgebildet, Kontrast verhält sich aber anders. Anfangs braucht es wenig Farbe, um sich von einem Hintergrund abzuheben. Je mehr Farbe man hinzufügt, desto geringer wird aber der Zuwachs an Kontrast. Dem tragen die oben zitierten Normen Rechnung, indem der Kontrast als dekadischer Logarithmus der Differenzen eines Remissionswertes definiert wird.

In Anlehnung an diese Normen ist in Tabelle 21 der Kontrast als dekadischer Logarithmus der Differenzen des L*-Wertes dargestellt. Ein Wert von Null entspricht dann einem Delta von 1. Dies geht konform mit der Tatsache, dass eine normalsichtige Person einen rechnerischen Farbunterschied von 1 nicht erkennen kann. Da L* maximal den Wert 100 einnehmen kann, ist der maximal mögliche Kontrastwert 2. Negative Kontrastwerte würden besagen, dass der Unterschied in der Helligkeit kleiner als 1 ist, somit ebenfalls nicht sichtbar. Daher wurden solche Werte, die auf Messwertschwankungen zurückzuführen sind, zu Null gesetzt.

Gemessen wird die Differenz der Helligkeiten der Volltonflächen der vier Farben Cyan (C), Magenta (M), Yellow (Y) und Schwarz (K) gegen die Helligkeit des Blattes an einer unbedruckten Stelle. Je nach Druckverfahren wird eine andere Druckvorlage gewählt. Einen Eindruck gewinnt man aus Abbildung 46. Die Volltonflächen ergeben sich bei der Deinking Testpage und der FOGRA-Druckvorlage aus dem Farbkeil, bei der Tiefdruckvorlage wurde direkt am Motiv gemessen. Hierzu wurden Stellen ausgewählt, an denen der Vollton die Messöffnung komplett bedeckte.



Abbildung 46 Verwendete Druckvorlagen

In der Tabelle 21 sind Werte, die eine der oben genannten Grenzen nicht erfüllen, farblich hervorgehoben. Wo der Wert unter 0,7 liegt, ist das Feld gelb markiert. Das ist drei Mal der Fall und betrifft jeweils das Farbfeld Magenta. Die Werte erfüllen aber noch die Vorgaben eines Kontrastes von mindestens 0,4. Bibeldruckpapier wurde nur mit Schwarz bedruckt, daher existieren keine Messungen in den anderen Farbfeldern, sondern nur der Wert im Feld K (K steht für „Kontrast“; schwarz wird zusätzlich gedruckt, um eben Helligkeitsunterschiede hervorzurufen und so den Kontrast zu erhöhen).

Insgesamt bleibt festzustellen, dass sich der Kontrast über die Farben und verschiedenen Papiere durch die Alterung nur unwesentlich ändert. Weder Farben noch Papiere müssen vom Kontrast bevorzugt oder vermieden werden.

Tabelle 21 Bedruckte Papiere - Kontrastbeurteilung vor/nach Alterung 16 Monate

Papier und Druckverfahren	log ΔL^* unbedruckte Stelle zu Farbe, ungealtert				log ΔL^* unbedruckte Stelle zu Farbe, gealtert			
	C	M	Y	K	C	M	Y	K
ISO 9706 Büro mit Trockentoner	1,6	0,9	1,7	1,8	1,6	0,8	1,7	1,8
ISO 9706 Büro mit Inkjet A – Tinte	1,6	0,9	1,5	1,8	1,5	0,7	1,4	1,7
ISO 9706 Büro mit Inkjet B – Pigm.	1,5	0,9	1,6	1,8	1,5	0,8	1,5	1,7
hf' gestr. mit Offset	1,6	0,6	1,7	1,8	1,6	0,8	1,6	1,7
hf' gestr. mit Flüssigtoner	1,6	0,8	1,7	1,9	1,6	0,6	1,6	1,9
hh' gestr. mit Tiefdruck	1,7	1,7	0,9	1,9	1,6	1,6	0,9	1,8
hh' natur mit Offset	1,2	0,4	1,5	1,4	1,1	0,6	1,3	1,2
Bibeldruck mit Tiefdruck	-	-	-	1,8	-	-	-	1,8

Der $L^*a^*b^*$ -Wert an den bedruckten Stellen im Papier wird mit einem Densitometer gemessen, wie in der Druckindustrie üblich. Verwendet wurde das Licht D55/2° und eine Messgeometrie von 0/45. Die so erhaltenen L^* -, a^* - und b^* -Werte sind den bisher beschriebenen, am Papier gemessenen ähnlich, aber nicht exakt gleich.

Zunächst wird am Blatt an einer Stelle ohne Farbe der Farbwert vor der Alterung bestimmt. Das gleiche geschieht nach der Alterung. Aus der Differenz der Farbvektoren ergibt sich die Farbverschiebung über die Alterung. Der Betrag des Vektors gibt an, wie groß die Verschiebung war. Dieser Betrag wird ΔE bzw. Farbdifferenz genannt. Wie schon des Öfteren erwähnt, ist ein Wert von 1 noch nicht sichtbar, bei einem Wert von 2 kann eine normalsichtige Person zwei sich überlappende Farben schon unterscheiden, Personen mit üblichen Farbschwächen können dies erst ab ca. 2,5. Generell spricht man ab einem ΔE von 10 von einer anderen Farbe.

So, wie an einer unbedruckten Stelle im Blatt vorgegangen wird, verfährt man auch mit den Volltonflächen aller vier Farben. Man kann also beurteilen, wie das Blatt selbst sich verändert und wie die Volltonflächen der Farben sich verändern.

Tabelle 22 Farbdifferenz ΔE vor und nach einer Alterung von 16 Monaten

Papier mit Druckverfahren	Blatt	C	M	Y	K
ISO 9706 Büro mit Trockentoner	22,8	17,3	10,6	9,1	4,1
ISO 9706 Büro mit Inkjet A – Tinte	21,0	23,8	14,1	8,2	1,7
ISO 9706 Büro mit Inkjet B – Pigm.	25,0	24,9	11,1	10,3	1,8
hf' gestr. mit Offset	15,5	17,9	10,2	12,6	2,5
hf' gestr. mit Flüssigtoner	16,4	14,0	10,0	7,7	7,9
hh' gestr. mit Tiefdruck	14,3	21,3	14,6	16,6	2,5
hh' natur mit Offset	32,7	36,1	22,5	25,4	22,5
Bibeldruck mit Tiefdruck	8,4	-	-	-	1,4

Tabelle 22 zeigt, dass die größte Farbverschiebung beim holzhaltigen Naturpapier stattfindet. Das war zu erwarten, da Lignin bekanntermaßen lichtempfindlich ist und beim Naturpapier

durch keine Strichschicht gedeckt geschützt wird. Sind die Papiere gestrichen, dann schützen sie die Fasern und der Farbverschiebung fällt deutlich geringer aus, auch bei holzhaltigem Papier. Das ISO 9706-konforme Büropapier aus Zellstoff zeigt ebenfalls erhebliche Farbdifferenzen nach der Alterung auf. Es ist besser als das holzhaltige Naturpapier, aber schlechter als die gestrichenen Papiere. Am besten schneidet das Bibeldruckpapier ab. An den unbedruckten Stellen hat es die geringste Farbverschiebung. Dies ist dem Anteil Titandioxid im Füllstoff zuzuschreiben. Dieser wirkt sich auch hier, wie schon beim Weißgrad, stabilisierend aus. Dort, wo die Farbdifferenz an der unbedruckten Stelle groß war, ist sie es auch in den Volltonflächen. Der überwiegende Anteil der Farbverschiebung ist also dem Papier zuzurechnen.

Sondersorten und Sondermessungen

Die nun dargestellten Messungen wurden nicht mehr in der Volltonfläche gemessen, sondern an Linien. Da die Messöffnung des Densitometers 3 mm beträgt, die Linien aber nur um 1 mm dick sind, wird das Messergebnis zwar durch die Linien beeinflusst, aber nicht allein durch sie bestimmt. Darum wird an dieser Stelle nicht mehr mit dem Kontrast gearbeitet, sondern direkt mit den Differenzen der Helligkeit und des Farbortes.

Tabelle 23 Sondermessungen – Alterung div. Schreibstoffe

Schreibstoff	ΔL^* unbedruckte Stelle zu Farbe, ungealtert	ΔL^* unbedruckte Stelle zu Farbe, gealtert
Techn. Zeichnung, Transparent von 1991	31,51	29,36
TippEx auf Recycling	-3,99	-6,93
roter Kugelschr. von 1985	28,15	28,93
blauer Kugelschr. von 1985	19,11	17,16
schwarzer Kugelschr. von 1986	13,80	14,11
roter Stempel von 1986	15,64	15,09
blauer Stempel von 1982	10,41	11,03
schwarzer Stempel von 1983	22,02	21,67

In Tabelle 23 sind Schreibstoffe aufgeführt, die auf alten, am Fachgebiet PMV gelagerten Akten gefunden wurden. Auf den Akten ist das Datum vermerkt, das Jahr wurde jeweils in der Tabelle angegeben. Die Technische Zeichnung stammt wieder aus dem Architekturbüro Hix.

Man sieht, dass alle Farbstoffe noch einen guten Helligkeitsunterschied und damit einen guten Kontrast aufweisen. Die Alterung über 12 Tage bei 80 °C und 65 % Luftfeuchte gemäß ISO 20494 führt zu keinen Veränderungen in der Helligkeitsdifferenz mehr. Dies deckt sich mit dem subjektiven Eindruck, den man von den Proben hat.

Gezeigt wird in Tabelle 23 zudem die zu erwartende Auswirkung der Alterung auf Korrekturflüssigkeit (TippEx). Hierzu wird auf ein Recyclingkopierpapier etwas Korrekturflüssigkeit aufgetragen und der Helligkeitsunterschied Blatt/Korrekturflüssigkeit vermessen. Die Korrekturflüssigkeit ist heller als das Papier, daher ist ΔL negativ. Durch die Alterung über 12 Tage dunkelt das Recyclingpapier ab, die Korrekturflüssigkeit nicht, weswegen der Helligkeitsunterschied über die Alterung noch ansteigt. Eine negative Auswirkung von Korrekturflüssigkeit auf die Lesbarkeit von Dokumenten nach Alterung ist also nicht zu befürchten.

Während des Projektes wurden die Proben, die eingelagert wurden, mit zwei verschiedenen Schreibmitteln beschriftet. Eines davon bleichte während der Alterungsversuche aus, wurde aber bei noch längerer Alterung wieder sichtbar. Dies kann man auf Abbildung 47 verfolgen.

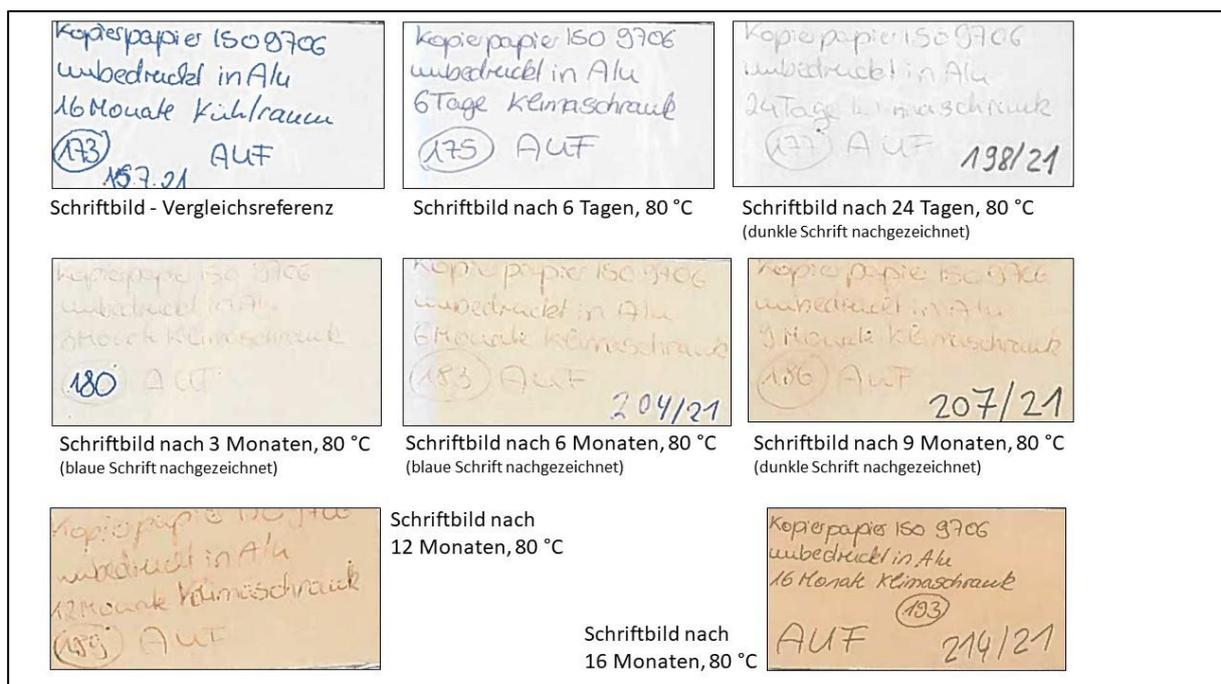


Abbildung 47 Kontrastverlauf einer Probenbeschriftung

Die entsprechenden Messungen finden sich in Tabelle 24. Beispielhaft sind der Beginn (vertreten durch das Etikett der im Kühlraum bei 4 °C eingelagerten Proben), die ausgebleichte Beschriftung nach 3 Monaten im Klimaschrank bei 80 °C und 65 % Luftfeuchte sowie die Beschriftung nach 16 Monaten dargestellt.

Tabelle 24 Helligkeits- und Farbortdifferenz bei Kuli-Beschriftung

beschriftetes Etikett	Blatt/Schreiber		ungealt./gealt.	
	ΔL	ΔE	ΔL	ΔE
16 Monate, 4°C	11,8	15,4	-	-
3 Monate, 80°C/65% LF	1,7	2,2	3,2	12,8
16 Monate, 80°C/65% LF	7,7	7,7	11,6	29,6

Man sieht, dass der Helligkeitsunterscheid am gekühlten Blatt zum Kuli ähnlich dem Wert des Schreibstoffs „Blauer Stempel“ in Tabelle 23 ist. Die Farbortdifferenz liegt nur unwesentlich höher. Nach drei Monaten Alterung nimmt der Wert stark ab, steigt dann wieder. Bei Vergleich ungealtert/gealtert werden die gealterten Etiketten gegen das gekühlte Etikett vermessen. Hier ist vor allem die Farbdifferenz ΔE interessant. Man sieht die starke Verschiebung des Farbortes des Etiketts durch die künstliche Alterung. Am Rande erwähnt sei noch die Beobachtung des Laborpersonals, dass es mit Bleistiftbeschriftungen nie Probleme bei der Erkennbarkeit der Schrift gab.

4.4.3 Auswertung der Veränderung sonstiger physikalischer Parameter durch künstliche Alterung

Zu den sonstigen physikalischen Parametern gehören allgemeine Werte wie flächenbezogene Masse, Dicke, Gleichgewichtsfeuchte und vor allem die Fasermorphologie. An sich passt an dies Stelle auch die Luftdurchlässigkeit, die aber aus Gründen der praktischen Darstellung bereits bei den mechanischen Eigenschaften miterläutert wurde. Da die Luftdurchlässigkeit keine offensichtlichen alterungsbedingten Änderungen zeigt, wird sie im Rahmen dieses Projektes nicht näher betrachtet.

Laborblätter

Auffällig sind Beobachtungen in der Fasermorphologie, die am Beispiel des CTMP in der folgenden Tabelle 25 dargestellt werden. Die Tabelle zeigt die Art der Alterung, die Proben-ID, welche zur Ordnung der Messergebnisse im vorliegenden Projekt verwendet wurde, die die Ergebnisse einer Faseranalyse mit dem FS5 Faseranalysator der Firma Valmet. Für dieses Gerät wird eine Faserprobe mit geringer, aber bekannter Masse (um 1 g) in Wasser dispergiert und stark verdünnt. Die Suspension durchläuft eine optische Einrichtung, bei der alle Fasern und Faserbruchstücke bildanalytisch vermessen und gezählt werden. Aus den Daten lassen sich kumulierte Zahlen generieren, die hier nach ISO 16065-1 dargestellt werden.

Tabelle 25 CTMP - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gealtert – Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert

	ungealt.	6 Mon. unverp.	6 Mon. in Alu	6 Mon. gekühlt in Alu	+ NBSK 6 Mon. in Alu	+ Linters 6 Mon. in Alu
Proben-ID	117	135	122	128	145	155
I(n) nach ISO in mm	0,61	0,67	0,66	0,62	0,64	0,65
I(l) nach ISO in mm	1,06	1,17	1,16	1,07	1,11	1,13
I(w) nach ISO in mm	1,68	1,78	1,79	1,68	1,71	1,74
Coarseness in mg/m	0,33	0,48	0,42	0,33	0,44	0,43
Faserbreite in µm	31,49	37,84	35,40	31,41	35,80	35,48
Faserkrümmung in %	4,11	4,78	4,67	3,89	4,57	4,74
Fibrillierung in %	1,90	1,87	1,83	1,89	2,05	1,97
Fines A in %	36,20	23,98	28,13	36,16	27,63	28,18
Fines B in %	37,44	13,72	18,77	38,74	21,84	20,80
Fines in %	89,33	82,80	85,74	89,55	84,96	85,45
F1(l) 0,00-0,20mm in %	40,20	28,13	32,08	39,98	31,70	32,10
F2(l) 0,20-0,50mm in %	22,60	23,30	22,55	22,03	23,58	23,03
F3(l) 0,50-1,20mm in %	17,23	20,35	19,30	17,43	19,90	19,80
F4(l) 1,20-2,00mm in %	11,95	16,38	14,90	12,28	14,55	14,48
F5(l) 2,00-3,20mm in %	6,63	9,70	9,10	7,05	8,65	8,90
F6(l) 3,20-7,60mm in %	1,43	2,10	2,15	1,25	1,68	1,70

Die einfachste Zahl ist die mittlere arithmetische Faserlänge, die sich aus der Anzahl der betrachteten Objekte und ihrer Länge ergibt. Im Bild oben ist dies I(n) nach ISO. Da bei Faserbruchstücken nicht immer klar ist, welche Dimension die Länge oder welche die Breite ist, werden die Ergebnisse gewichtet, I(l) und I(w). Eine genauere Erläuterung führt an dieser Stelle zu weit, ist auch nicht nötig, da die wesentlichen Unterschiede in den farblich hinterlegten Blöcken zu finden sind.

Gelb sind der ungealterte CTMP und der im Kühlschrank gealterte CTMP hinterlegt. Beide Blöcke unterscheiden sich nicht signifikant. Rot hinterlegt sind die Alterungen von CTMP in Alufolie. Innerhalb dieser Blöcke unterscheiden sich die Werte ebenfalls nicht signifikant. Aber vom gelben zum roten Block sind die Feinstoffe (Fines A, Fines B und Fines allgemein) stark gesunken. Offensichtlich ist die Anzahl an Feinstoffen stark zurückgegangen, egal welcher technologischen Ausprägung (Fines A beschreibt flockenartige Feinstoffe, Fines B lamellenartige Feinstoffe und Fines allgemein meint Faserbruchstücke). Auch die schon als Fasern erkennbaren Bruchstücke bis 0,2 mm Länge nehmen ab. Interpretieren lässt sich dies dadurch, dass tatsächlich feine Faserbruchstücke bei der Alterung so zersetzt wurden, dass sie sich verflüchtigt haben bzw. komplett bei der Desintegration in Wasser zerfallen sind.

Statistisch führt der Wegfall an Feinstoffen zu einer Zunahme der Faseranteile größerer Länge. Fasern der Längengruppe 0,2 bis 0,5 mm sind noch nicht betroffen, die Fasern ab

0,5 mm Länge sehr deutlich. Absolut hat sich der Anteil an längeren Fasern nicht erhöht, wohl aber relativ, da sich der Anteil der Feinstoffe absolut verringert hat.

Noch deutlicher fällt der Abfall ein Feinstoffanteilen im Vergleich zum blau hinterlegten Block aus. Hierbei handelt es sich um unverpackt gealterten CTMP. Bei diesem werden die Feinstoffe noch stärker angegriffen. Dies kann an einer aggressiveren Alterung liegen, weil ungehindert alle im Klimaschrank vorhandenen Abbauprodukte auf den CTPM einwirken können. Allerdings spricht dagegen, dass bei den anderen Parametern tendenziell die Alterung in Alufolie zur niedrigeren mechanischen Werten geführt hat als die Alterung unverpackt (siehe Abbildung 20). Ausgeschlossen werden kann es jedoch auch nicht, denn die Unterschiede sind nur tendenziell und liegen im Rahmen der Messschwankungen.

Möglich wäre auch, dass in der unverpackten Probe Abbauprodukte eher die Möglichkeit haben zu entweichen. Das wären minimale Abweichungen in der Masse der Proben. Diese wurden tatsächlich am unverpackt 6 Monate gealterten Laborblatt (Proben-ID135) festgestellt. Die durchschnittliche Masse der für die Versuche verwendeten klimatisierten Laborblätter (Blattnummern 228 bis 235 sowie 237 und 238) beträgt vor der Alterung 2,4589 g mit einer Standardabweichung von 0,0125 g. Nach der Alterung beträgt sie 2,4232 g mit einer Standardabweichung von 0,0069g. Die Differenz beträgt 0,03569 g. Die mittlere Standardabweichung (berechnet aus den Mittelwerten der Varianzen) beträgt 0,0143, d. h. die Abweichung ist ca. 2,5-mal höher als die mittlere Standardabweichung. Mit Student-t-Verteilung lässt sich ausrechnen, dass die Mittelwerte der beiden Messungen nur mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 1 % der gleichen Stichprobe entstammen. Der Unterschied kann also als signifikant betrachtet werden.

Einschränkend sei jedoch auf die folgende Tabelle 26 verwiesen, insbesondere auf die gemessenen Feuchten:

Tabelle 26 CTMP - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gealtert – Allgemeine Parameter ungealtert/6 Monate gealtert

	ungealt.	6 Mon unverb.	6 Mon. in Alu	6 Mon gekühlt in Alu	+ NBSK 6 Mon in Alu	+ Linters 6 Mon. in Alu
Proben-ID	117	135	122	128	145	155
Gesamtfüllstoffgehalt in %	3,527	4,481	4,518	4,070	4,288	4,247
Calciumcarbonat in %	2,865	3,758	3,723	3,450	3,438	3,471
Kaolin in %	0,665	0,745	0,797	0,621	0,552	0,777
Blattgewicht, Laborblatt in g	2,547	2,423	2,443	2,563	2,447	2,406
Flächenbez. Masse in g/m²	80,331	76,442	77,069	80,844	77,189	75,914
Dicke in mm	0,168	0,165	0,167	0,161	0,166	0,166
Feuchte in %	9,036	5,198	6,266	8,516	5,896	6,400

Man sieht, dass Proben, die in der vorherigen Tabelle 25 einen niedrigen Feinstoffgehalt aufweisen, auch eine niedrige Feuchte nach der Klimatisierung haben. Dies ist konsistent, denn weniger Feinstoff bedeutet weniger spezifische Oberfläche und damit weniger Adsorption von Feuchte. Gleichzeitig beeinflusst dies die flächenbezogene Masse bzw. die Masse des Laborblatts. Dieses wird inklusive Feuchte angegeben. Die sehr deutlichen Unterschiede in der flächenbezogenen Masse sind also durch die Unterschiede in der Feuchte zu erklären.

Am Beispiel der Proben-ID 135 kann zwar eine signifikante Absenkung der Masse des Laborblatts nach der Alterung festgestellt werden. Dies könnte aber an einer Abnahme des Feuchtegehalts im Blatt nach Klimatisierung liegen. Abschließend ist dies nicht zu beantworten, da vor der Alterung an exakt den Laborblättern, die zur Alterung vorgesehen waren, keine Feuchte bestimmt werden konnte, um diese nicht vorzuschädigen.

Andererseits zeigt sich die Abnahme an Feinstoff konsistent zu den Ergebnissen der Optik (siehe Tabelle 11). Der sinkende Streukoeffizient kann mit den fasermorphologischen Veränderungen erklärt werden. An dieser Stelle zeigt sich ein mögliches neues Forschungsprojekt, denn die Auswirkung der beschleunigten Alterung auf die Fasermorphologie wurde bisher noch nicht untersucht. Zur Abrundung seien noch auf die Ergebnisse mit Linters und NBSK dargestellt. Diese weisen die genannten Auffälligkeiten beim Feinstoff nicht auf, d. h. der Abbau der Feinstoffe bleibt auf das ligninhaltige Material CTMP beschränkt.

Tabelle 27 Linters - 6 Monate bei 80 °C oder 4 °C gealtert – Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert

	ungealt.	6 Mon unverb.	6 Mon. in Alu	6 Mon gekühlt in Alu	+ NBSK 6 Mon in Alu	+ Linters 6 Mon. in Alu
Proben-ID	64	82	69	75	92	102
l(n) nach ISO in mm	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,70
l(l) nach ISO in mm	1,06	1,04	1,05	1,05	1,03	1,04
l(w) nach ISO in mm	1,48	1,45	1,47	1,48	1,45	1,45
Coarseness in mg/m	0,18	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17
Faserbreite in µm	23,20	22,75	22,77	23,28	22,64	22,50
Faserkrümmung in %	12,32	12,32	12,18	12,03	12,08	11,97
Fibrillierung in %	1,68	1,70	1,73	1,75	1,71	1,63
Fines A in %	18,98	19,57	19,51	18,83	19,88	20,03
Fines B in %	6,99	6,32	6,77	6,89	6,59	6,53
Fines in %	67,12	68,36	68,17	67,21	68,64	68,67
F1(l) 0,00-0,20mm in %	13,53	14,00	13,77	13,55	14,30	14,15
F2(l) 0,20-0,50mm in %	24,68	24,80	24,50	24,73	25,15	24,63
F3(l) 0,50-1,20mm in %	32,83	33,50	33,57	33,33	33,58	33,83
F4(l) 1,20-2,00mm in %	21,05	20,35	20,70	20,53	19,85	19,95
F5(l) 2,00-3,20mm in %	7,08	6,48	6,57	7,03	6,20	6,53
F6(l) 3,20-7,60mm in %	0,88	0,85	0,93	0,88	0,90	0,90

Tendenziell ist beim Linters eher zu beobachten, dass die Faserklassen F4 und F5 leicht abnehmen. Denkbar ist, dass es durch die Alterung zu Faserschädigungen kommt, bei der im Feinstoffteil einerseits Bruchstücke so zerkleinert werden, dass sie nicht mehr mitgemessen werden, andererseits aus den Faserklassen mit größerer Länge Bruchstücke in die Fraktionen mit kleinerer Länge abgegeben werden. In den oberen Faserlängensklassen fehlen diese Bruchstücke und führen zu tendenziell kürzeren Fasern in der betroffenen Klasse. Jedoch liegen die Unterschiede nahe im Bereich der zu erwartenden Schwankungen und dürfen daher nicht überinterpretiert werden.

Tabelle 28 NBSK - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gelagert - Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert

	ungealt.	6 Mon unverp.	6 Mon. in Alu	6 Mon gekühlt in Alu	+ Linters 6 Mon in Alu	+ CTMP 6 Mon. in Alu
Proben-ID	1	29	11	22	39	49
I(n) nach ISO in mm	1,08	1,10	1,09	1,10	1,10	1,09
I(l) nach ISO in mm	1,98	1,99	1,94	2,03	1,96	1,94
I(w) nach ISO in mm	2,68	2,69	2,64	2,74	2,65	2,60
Coarseness in mg/m	0,26	0,22	0,23	0,26	0,22	0,22
Faserbreite in µm	28,47	26,49	26,51	28,37	26,22	26,13
Faserkrümmung in %	6,77	8,25	8,68	6,98	8,64	8,39
Fibrillierung in %	0,75	0,88	0,84	0,75	0,90	0,83
Fines A in %	16,84	18,01	18,26	15,67	18,44	17,97
Fines B in %	5,55	7,10	6,40	5,75	7,39	6,20
Fines in %	76,09	76,77	77,03	74,70	77,04	76,39
F1(I) 0,00-0,20mm in %	16,18	15,80	15,95	15,23	15,93	15,33
F2(I) 0,20-0,50mm in %	11,73	11,25	11,40	11,43	11,28	11,30
F3(I) 0,50-1,20mm in %	14,13	14,40	14,95	13,53	14,30	15,03
F4(I) 1,20-2,00mm in %	18,23	18,50	19,53	18,23	19,70	19,57
F5(I) 2,00-3,20mm in %	26,20	26,10	25,33	26,40	25,50	25,87
F6(I) 3,20-7,60mm in %	13,58	13,98	12,90	15,23	13,30	12,90

NBSK zeigt ein ähnliches Bild wie Linters. Die beobachtbaren Unterschiede sind nicht signifikant. Damit hebt sich bei der fasermorphologischen Untersuchung der CTMP hervor. Zu erwähnen ist noch, dass weder Linters noch NBSK auffällige Veränderungen in der Fasermorphologie zeigen, wenn sie mit CTMP zusammen gelagert werden. Der beobachtete Abbau bleibt auf den CTMP beschränkt. Es scheint sich um einen intrinsischen Effekt der Faser zu handeln.

Industriepapiere, unbedruckt

Um zu prüfen, ob die an Laborblättern beobachteten Veränderungen sich auch an Industriepapieren wiederfinden, wird beispielhaft das Recycling-Kopierpapier untersucht. Die Werte wurden ungealtert, nach 12 Tagen und nach 16 Monaten Alterung gemessen. Aus den in Tabelle 29 dargestellten Werten ist zu entnehmen, dass das am CTMP-Laborblatt beschriebene Phänomen auch am Industriepapier auftritt. Der Effekt ist sogar schon nach 12 Tagen Alterung sichtbar!

Tabelle 29 Recyclingpapier – unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert - Fasermorphologie ungealtert/
12Tage/ 16 Monate gealtert

	ungeal- tert	12 Tage	16 Mon.
Proben-ID	213	214	220
l(n) nach ISO in mm	0,61	0,62	0,61
l(l) nach ISO in mm	0,92	0,94	0,90
l(w) nach ISO in mm	1,42	1,45	1,38
Coarseness in mg/m	0,18	0,21	0,22
Faserbreite in µm	22,21	23,68	23,95
Faserkrümmung in %	8,01	9,17	10,86
Fibrillierung in %	2,47	2,31	1,70
Fines A in %	42,54	35,88	33,17
Fines B in %	25,01	16,79	5,50
Fines in %	88,36	85,01	83,11
F1(l) 0,00-0,20mm in %	36,35	31,35	29,13
F2(l) 0,20-0,50mm in %	22,30	22,75	25,20
F3(l) 0,50-1,20mm in %	29,08	32,28	32,80
F4(l) 1,20-2,00mm in %	7,33	7,93	7,65
F5(l) 2,00-3,20mm in %	3,85	4,23	4,10
F6(l) 3,20-7,60mm in %	1,13	1,40	1,10

4.4.4 Auswertung der Veränderung chem. Parameter durch künstl. Alterung

4.4.4.1 pH-Wert, Kappa-Zahl, Alkalireserve

Wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten erwähnt, sind der pH-Wert der Probe (gemessen im Kaltwasserextrakt), die Kappa-Zahl und die Alkalireserve die wichtigen chemischen Parameter, mit denen die Alterungsbeständigkeit von Papier beurteilt wird. In Tabelle 30 sind die Anforderungen an diese drei Parameter aus den wichtigsten Normen zur Bewertung der Alterungsbeständigkeit gegenübergestellt.

Tabelle 30 Übersicht über Anforderungen an chemische Parameter für alterungsbeständige Papiere

Parameter	DIN 6738: 2007-03	DIN EN ISO 9706: 2010-02	ISO 20494: 2017-12
pH-Wert im KWE	(7,5 – 9,5) Anmerkung: Keine direkte Anforderung, aber als Stand der Technik für höchste LDK angegeben	7,5 - 10	7,5 – 10
Kappa-Zahl	-	< 5,0	-
Alkalireserve	(≥ 20 g CaCO ₃ /kg)*	$\geq 0,4$ mol Säure/kg bzw. ≥ 20 g CaCO ₃ /kg	$\geq 0,8$ mol Säure/kg bzw. ≥ 40 g CaCO ₃ /kg

Da bei den chemischen Parametern nicht nur die prozentuale Veränderung der Messwerte im Laufe der Lagerung von Bedeutung ist, sondern auch die Absolutwerte für die Bewertung herangezogen werden müssen, sind im Folgenden die Absolutwerte der gemessenen chemischen Parameter dargestellt. Die Bestimmung der chemischen Parameter wurde anhand der folgenden Messmethoden durchgeführt:

- Kappa-Zahl nach ISO 302:2015-08
- Alkalireserve nach ISO 10716:2022-02
- pH-Wert im Kaltwasserextrakt (KWE) nach ISO 6588-1:2021-11

In den folgenden Abbildungen sind die Messwerte für die Kappazahl, die Alkalireserve in mol/kg (zur besseren Darstellung um den Faktor 10 multipliziert) und den pH-Wert im KWE, aufgetragen.

Laborpapiere

Linters

Die untersuchten Linters-Laborblätter erfüllen mit einer Kappazahl von 0,2, einer Alkalireserve von 0,63 mol/kg und einem pH-Wert im KWE von 9,5 im ungealterten Zustand die Anforderungen an ein alterungsbeständiges Papier (vgl. Tabelle 30). In Abbildung 48 ist der Verlauf der chemischen Messwerte für die unverpackte Lagerung unter Normbedingungen (23 °C/50 % LF) bis zur maximalen Lagerungsdauer von 16 Monaten aufgetragen. In diesem Zeitraum steigt die Kappazahl als Maß für die Konzentration an oxidierbaren Stoffen kontinuierlich an. Die Werte nach 12 und 16 Monaten unterscheiden sich nicht signifikant und liegen im Bereich von 4,0, damit würden die Laborblätter auch nach 16 Monaten noch der Anforderung einer Kappazahl < 5,0 nach ISO 9706 genügen. Der pH-Wert und die Alkalireserve nehmen in diesem Zeitraum kontinuierlich ab. Der pH-Wert sinkt von ursprünglich 9,5 bis auf 8,0 nach 12 bzw. 16 Monaten, die Alkalireserve nimmt im gleichen Zeitraum von 0,63 mol/kg auf

0,48 mol/kg ab. Auch diese Werte würden noch den Anforderungen der ISO 9706 für ein alterungsbeständiges Papier entsprechen. Die Messwerte belegen, dass in dem Faserstoff im Zeitraum von 16 Monaten Abbaureaktionen stattgefunden haben, die mit einer Verringerung des pH-Wertes (aber immer noch im alkalischen Bereich) und mit einem Verbrauch der Alkalireserve verbunden sind. Diese Abbaureaktionen nehmen in ihrer Geschwindigkeit im Normklima offensichtlich nach längerer Lagerungsdauer ab.

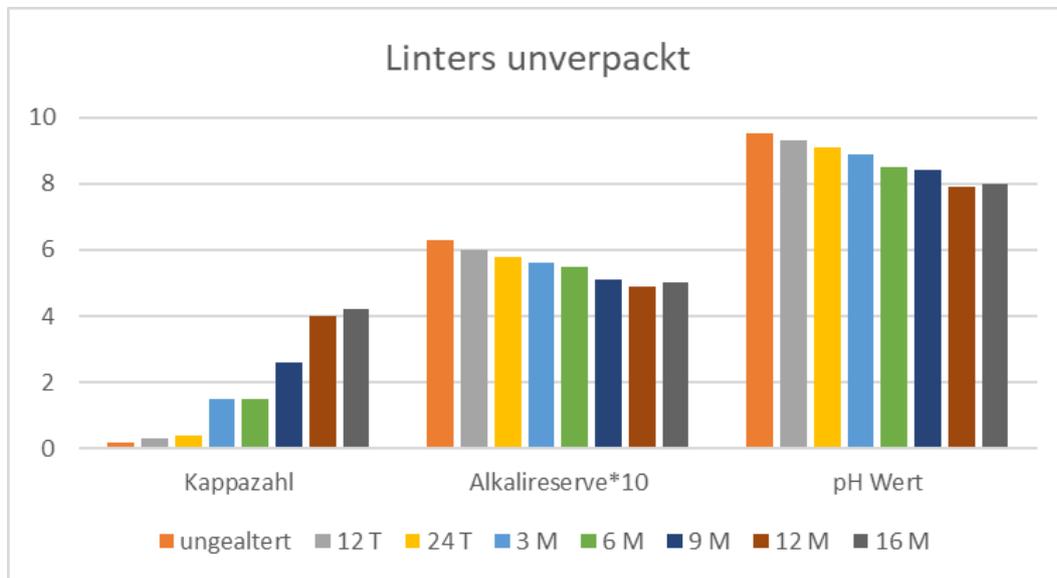


Abbildung 48 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, 23 °C, 50 % LF)
 In Abbildung 49 ist der Verlauf der chemischen Messwerte von Linters bei der Lagerung im Klimaschrank (80 °C/65 % LF) dargestellt. Die Veränderungen von Kappazahl, Alkalireserve und pH-Wert sind, trotz der deutlich höheren Lagerungstemperatur und –luftfeuchte, mit denen der unverpackten Lagerung unter Normbedingungen vergleichbar. Allerdings ist hier kein Gleichgewichtszustand nach 12 bzw. 16 Monaten erkennbar.

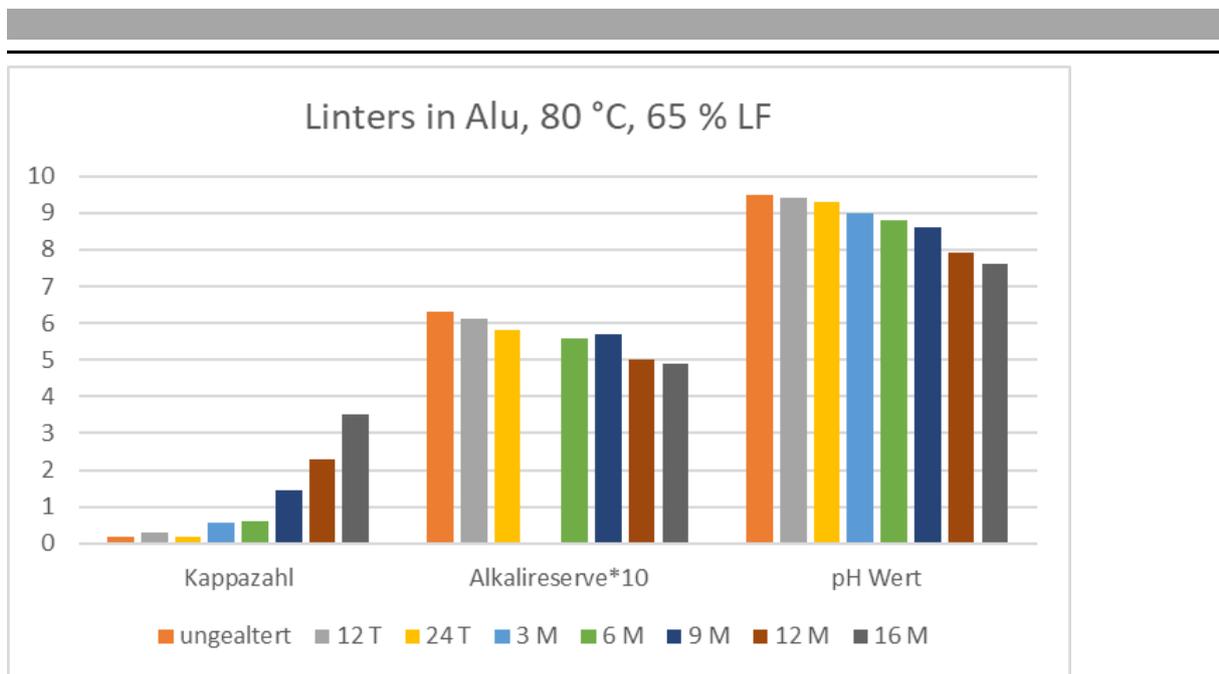


Abbildung 49 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C, 65 % LF)

Etwas langsamer laufen die Abbaureaktionen der Cellulose offenbar bei der Lagerung von Linters in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C ab (vgl. Abbildung 50). Die Kappazahl steigt nach 16 Monaten nur auf 2,0 (im Vergleich zu 3,5 im bei 80 °C und 4,2 unverpackt im Normklima). Der pH-Wert sinkt auf 8,0 ab (vergleichbar mit unverpackt im Normklima), die verbleibende Alkalireserve ist mit 0,55 mol/kg höher als bei den anderen Lagerungsvarianten.

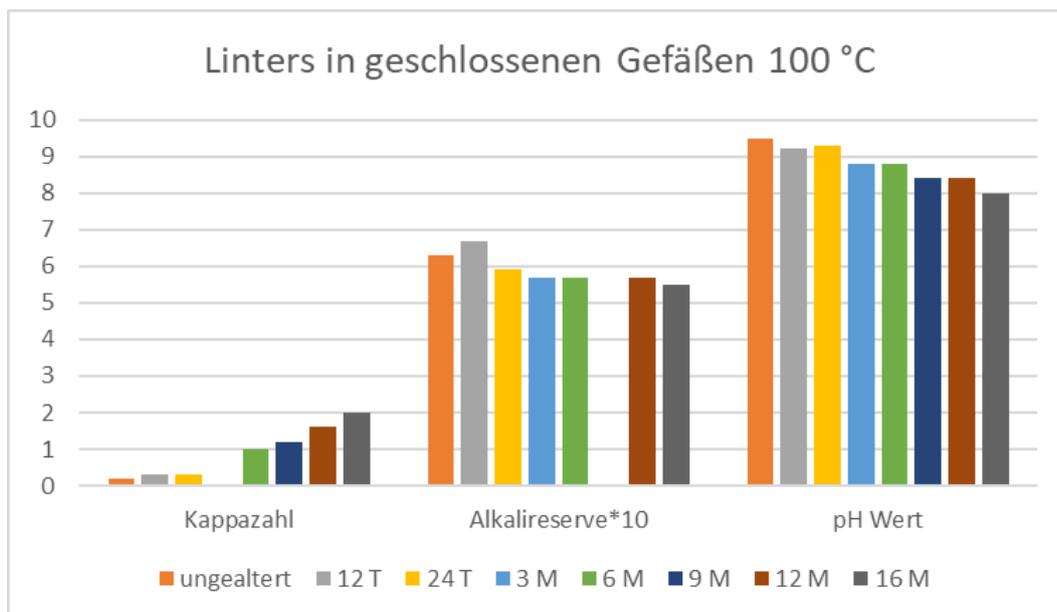


Abbildung 50 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C)

Der Einfluss der Zusammenlagerung von Linters mit den anderen beiden Faserstoffen wurde nach 9 Monaten Lagerungszeit untersucht (siehe Abbildung 51).

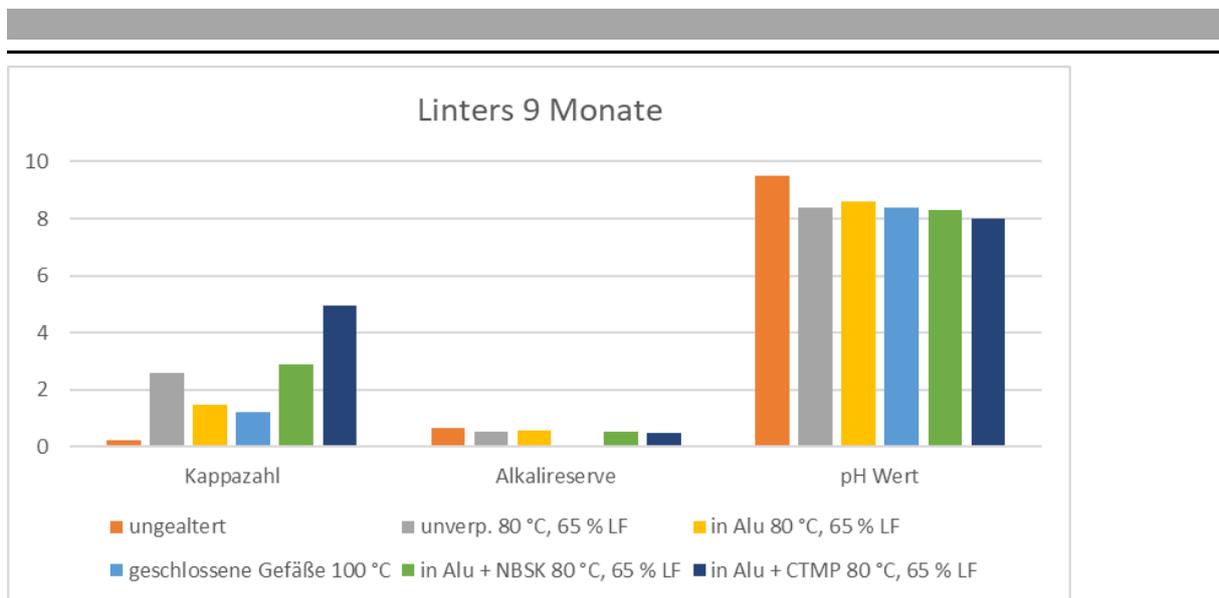


Abbildung 51 Linters – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten

Es ist erkennbar, dass die Zusammenlagerung des Linterspapiers mit CTMP zu einer deutlich höheren Kappazahl führt als bei der Lagerung von Linters ohne andere Materialien. Bei NBSK ist dieser Einfluss nicht so stark. In den Werten für die Alkalireserve und den pH-Wert sind diese Unterschiede bei der Zusammenlagerung nicht so auffällig.

Der Vergleich aller untersuchten Lagerungsvarianten von Linters (ohne Zusammenlagerung mit anderen Materialien) nach 16 Monaten wird in Abbildung 52 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei der Lagerung unter Kühlbedingungen (4 °C) und im Normklima (23 °C, 50 % LF) auch nach 16 Monaten Lagerungszeit kaum Änderungen in den chemischen Kennwerten gegenüber der ungealterten Probe stattfinden. Dagegen sind die Änderungen bei der beschleunigten Alterung deutlich höher, wobei der Anstieg in der Kappazahl im geschlossenen Gefäß bei 100 °C geringer ausfällt als bei den Lagerungsvarianten im Klimaschrank bei 80 °C, 65 % LF. Bei der Lagerung im Klimaschrank gibt es keine signifikanten Unterschiede bei der Verpackung der Linters-Laborpapiere in Aluminiumfolie gegenüber der unverpackten Lagerung.

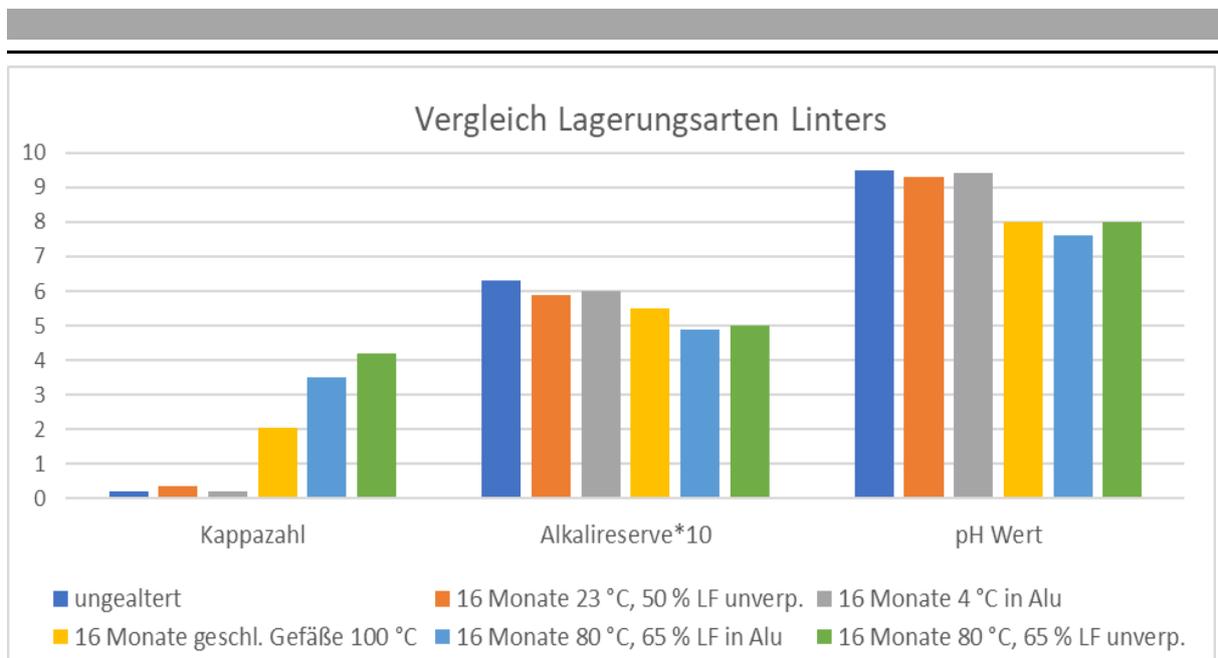


Abbildung 52 Linters – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten

CTMP

Die CTMP-Laborblätter haben bereits im ungealterten Zustand eine Kappazahl von 101. Bei den folgenden Abbildungen ist zu beachten, dass der Messwert für die Kappazahl jeweils durch 10 geteilt wurde, um eine sinnvolle Darstellung im Diagramm zu ermöglichen. Im Lauf der 16-monatigen Lagerung steigt die Kappazahl als Maß für die Konzentration der oxidierbaren Verbindungen durch den Abbau der Cellulose, des Lignins und der Begleitstoffe im CTMP weiter an. Der Gültigkeitsbereich der ISO 302 zur Bestimmung der Kappazahl ist auf den Messbereich zwischen 1 und 100 festgelegt, so dass die hier angegebenen Messwerte nur orientierenden Charakter haben können. Aufgrund der hohen Kappazahl liegen die CTMP-Laborblätter schon im ungealterten Zustand sehr deutlich außerhalb der Anforderungen der ISO 9706. Bei der unverpackten Lagerung der Blätter im Normklima (siehe Abbildung 53) bleibt die Alkalireserve im Bereich von 0,58 mol/kg über die gesamten 16 Monate konstant. Der pH-Wert im KWE reduziert sich innerhalb der 16 Monate deutlich von 9,2 auf 6,7 und liegt damit schon im kritischen sauren Bereich. Die Kappazahl steigt innerhalb von wenigen Monaten bereits auf Werte um die 120.

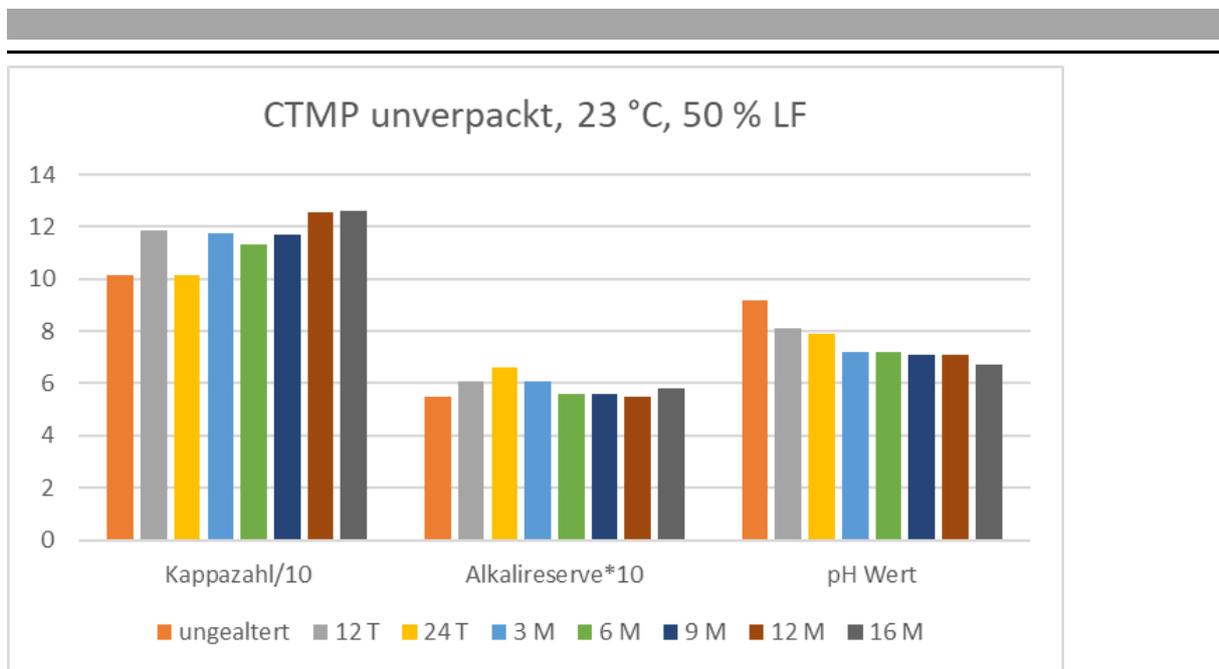


Abbildung 53 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, Normklima 23 °C, 50 % LF)

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Untersuchungen für die beschleunigte Alterung bei 80 °C, 65 % LF ersichtlich. Bei der beschleunigten Alterung steigt die Kappazahl etwas schneller als unter Normbedingungen, die Alkalireserve sinkt deutlich stärker, aber der Verlauf des pH-Wertes ist nahezu identisch. Offensichtlich hat das zugesetzte CaCO_3 als Alkalireserve tatsächlich zum Abpuffern entstandener saurer Verbindungen geführt.

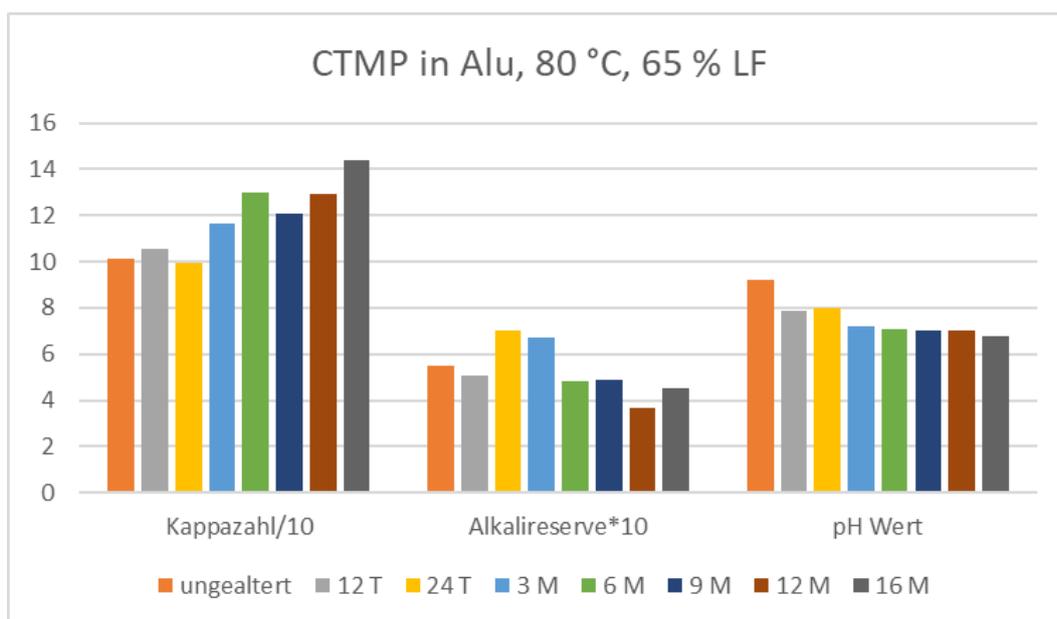


Abbildung 54 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Die analogen Untersuchungsergebnisse bei Lagerung von CTMP in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C ist in Abbildung 55 dargestellt.

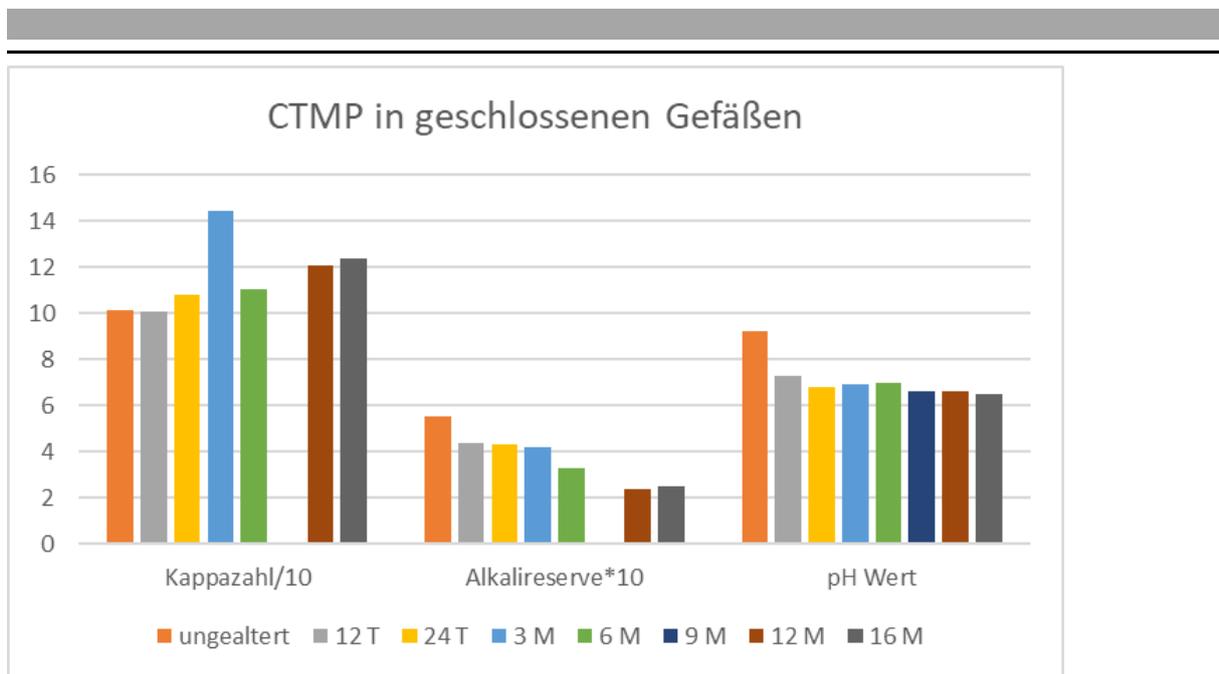


Abbildung 55 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C)

Die Erhöhung der Kappazahl verhält sich ähnlich der der unverpackten Lagerung im Normklima. Allerdings wird die Alkalireserve bei CTMP in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C deutlich stärker reduziert als im Normklima und bei 80 °C, 65 % LF. Der pH-Wert sinkt dagegen nicht weiter ab als bei den vorherigen Lagerungen und liegt nach 16 Monaten nur noch bei 0,24 mol/kg.

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der Zusammenlagerung von CTMP mit anderen Faserstoffen vergleichend dargestellt. Ein signifikanter Unterschied der chemischen Kennwerte bei Zusammenlagerung von CTMP mit Linters bzw. NBSK wurde nicht festgestellt.

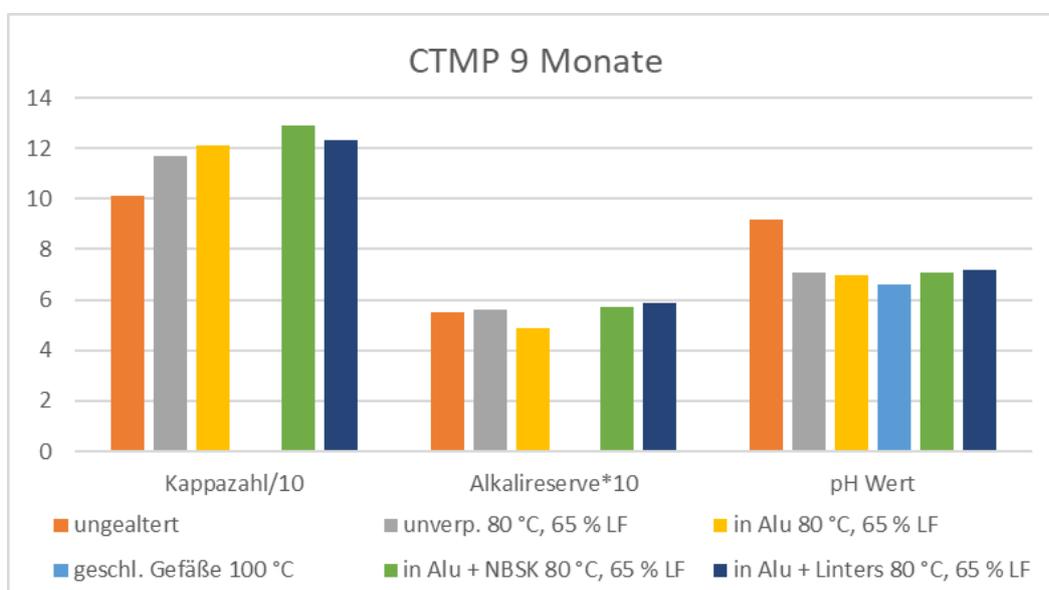


Abbildung 56 CTMP – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 9 Monaten

NBSK

Als letzter Faserstoff soll das NBSK betrachtet werden. Dieser Faserstoff ist ligninfrei. NBSK ist mit einer Kappazahl von 1,6, einer Alkalireserve von 0,6 mol/kg und einem pH-Wert im KWE von 9,3 alterungsbeständig im Sinne der ISO 9706. Auch für NBSK soll der Einfluss der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen diskutiert werden. Abbildung 57 zeigt zunächst die unverpackte Lagerung im Normklima. Auch in den NBSK-Laborblättern steigt die Kappazahl kontinuierlich auf ca. 7 nach 16 Monaten an und der pH-Wert geht kontinuierlich auf 7,4 zurück. Die Veränderungen sind etwas größer als beim Linters, aber etwas schwächer als beim CTMP, was der erwarteten Abstufung für die Alterungsbeständigkeit dieser Faserstoffe entspricht.

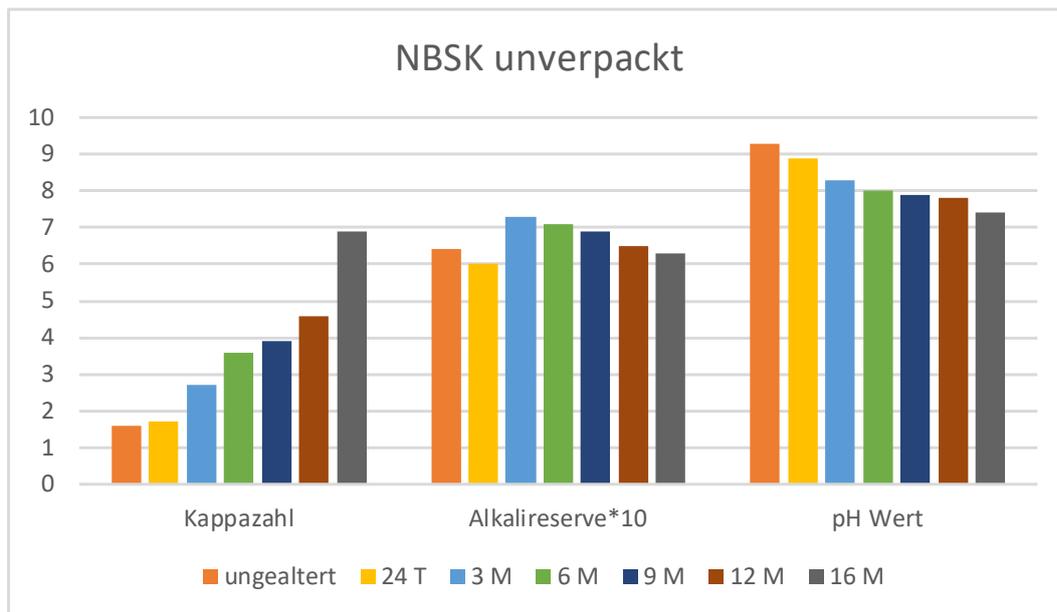


Abbildung 57 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, Normbedingungen 23 °C, 50 % LF)

Im Vergleich zum Normklima verändert sich NBSK bei 80 °C, 65 % LF etwas schneller (siehe Abbildung 60). Die Kappazahl steigt im Vergleichszeitraum bis auf 8,5, der pH-Wert sinkt etwas schneller auf 7,2. Die Alkalireserve zeigt keinen klaren Trend (wie auch bei der Lagerung unter Normbedingungen).

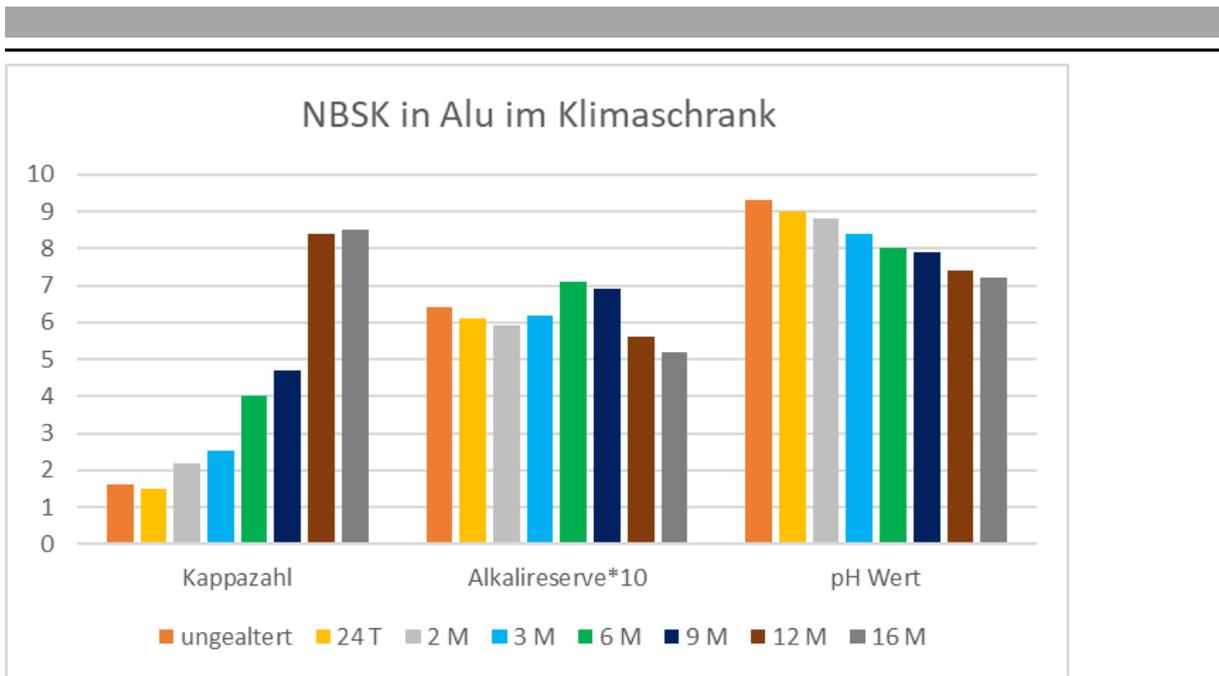


Abbildung 58 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Dagegen zeigt die Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C einen deutlich langsameren Abbau der Celluloseketten. Die Kappazahl steigt im Vergleichszeitraum nur auf max. 3,6, die Alkalireserve ist sehr konstant bei ca. 0,6 mol/kg und der pH-Wert sinkt nur moderat auf 7,6 (siehe Abbildung 60).

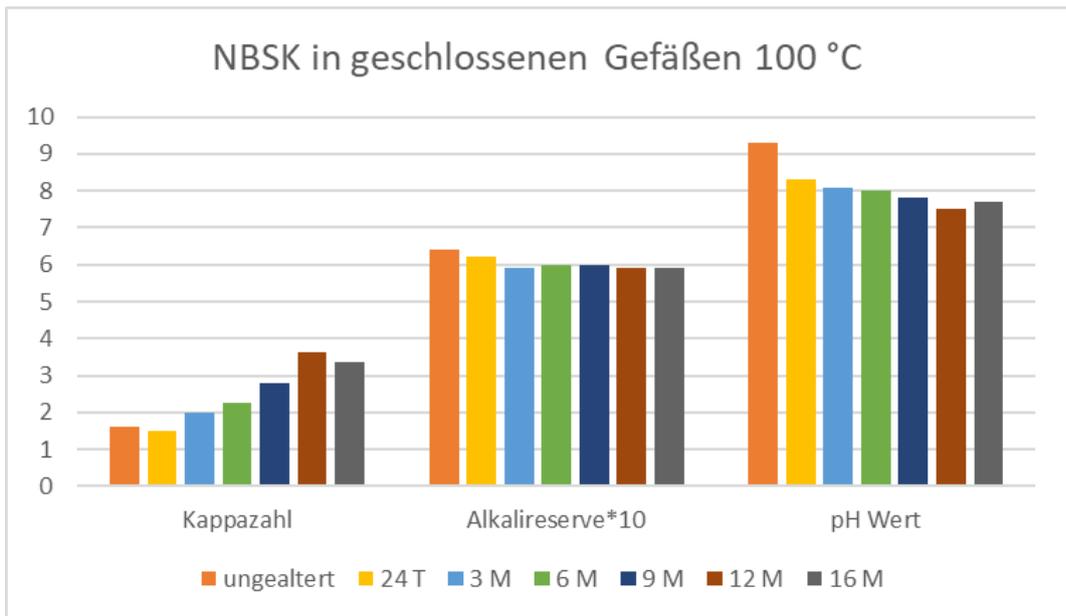


Abbildung 59 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen)

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Zusammenlagerung mit anderen Faserstoffen dargestellt.

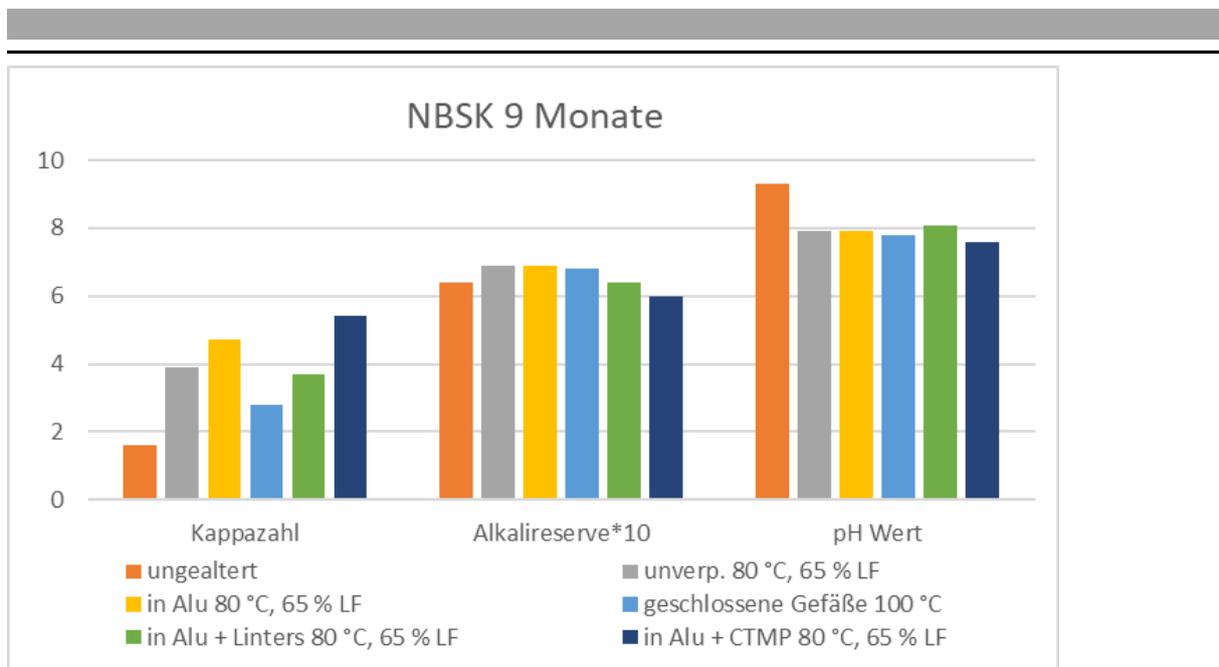


Abbildung 60 NBSK – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 9 Monaten

Zusätzlich zu den moderaten Veränderungen bei der Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C fällt die beschleunigte Alterung bei der Zusammenlagerung mit CTMP auf.

In Abbildung 61 sind die Ergebnisse der Lagerung von NBSK nach 16 Monaten zusammengefasst (ohne Zusammenlagerung). Es ist zu erkennen, dass bei der beschleunigten Alterung bei 80 °C, 65 % LF die stärksten Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Probe auftreten, wobei die Veränderungen der Probe, die in Aluminium verpackt ist, stärker sind als die der unverpackten Probe. Die gekühlte Lagerung und die Lagerung unter Normbedingungen (23 °C, 50 % LF) zeigen auch nach 16 Monaten Lagerung nur geringe Differenzen zur ungealterten Probe.

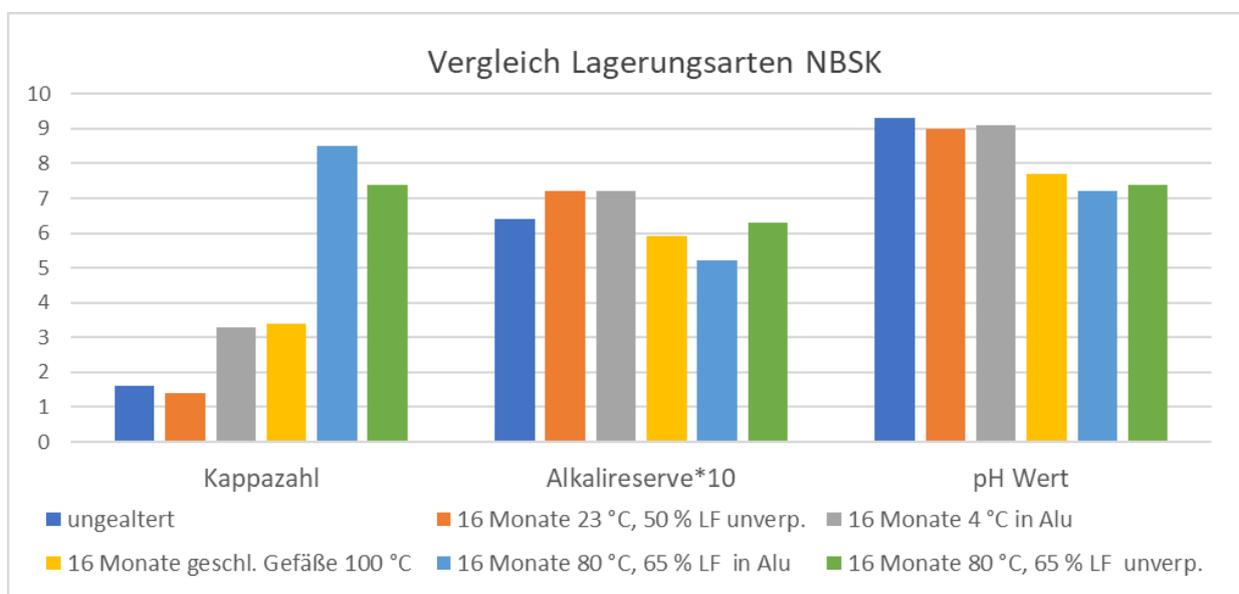


Abbildung 61 NBSK – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten

Zusammenfassung

Sämtliche Laborpapiere zeigen nach dem Ablauf von 16 Monaten Lagerung mehr oder weniger stark ausgeprägte Auswirkungen von chemischen Zersetzungsreaktionen des Fasermaterials. Dabei ist das Linterspapier am meisten alterungsbeständig, NBSK zeigt etwas stärkere Reaktionen auf die beschleunigte Alterung. Beim CTMP als einzigem ligninhaltigem Faserstoff sind die Auswirkungen der Alterung auf Kappazahl und pH-Wert am größten. Interessanterweise haben die Untersuchungen zum Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die chemischen Eigenschaften der Faserstoffe ergeben, dass neben der gekühlten Lagerung bei 4 °C und der Lagerung unter Normbedingungen (23 °C, 65 % LF) auch die Lagerung bei 100 °C in geschlossenen Gefäßen zu langsameren chemischen Zersetzungsreaktionen führt als bei der beschleunigten Lagerung im Klimaschrank bei 80 °C, 65 % LF. Zumindest ist die befürchtete Autoxidation und damit schnellere Zersetzung der Cellulosemoleküle in den geschlossenen Gefäßen bei 100 °C ausgeblieben. Ob dies eine Folge der geringeren Luftfeuchtigkeit sein könnte (konnte im geschlossenen Glasgefäß nicht gemessen werden) oder möglicherweise mit einer Adsorption der VOC-Stoffe an der Gefäßwand zusammenhängt, kann zunächst nicht geklärt werden. Die Untersuchungen zur Zusammenlagerung von Faserstoffen haben ergeben, dass die besser alterungsbeständigen Papiere in den chemischen Parametern, vor allem der Kappa-Zahl und dem pH-Wert, von den weniger alterungsbeständigen Papieren negativ beeinflusst werden. Dies fällt insbesondere bei der Zusammenlagerung von Linters mit CTMP auf, in der Linters deutliche Abbaureaktionen zeigt, die bei der Einzellagerung nicht zu beobachten waren.

Industriepapiere, unbedruckt

Hadernpapier

Analog der Bearbeitung in den vorherigen Kapiteln soll hier mit dem Hadernpapier begonnen werden. Das Hadernpapier erfüllt in allen Parametern die chemischen Anforderungen der ISO 9706. Die Kappazahl ist mit 0,9 im ungealterten Zustand sehr gering, die Alkalireserve mit 1,4 mol/kg und der pH-Wert von 9,2 ausreichend hoch. Abbildung 62 zeigt den Verlauf der chemischen Parameter des Hadernpapiers, in Aluminiumfolie verpackt und bei 80 °C, 65 % LF bis zu 16 Monate gelagert.

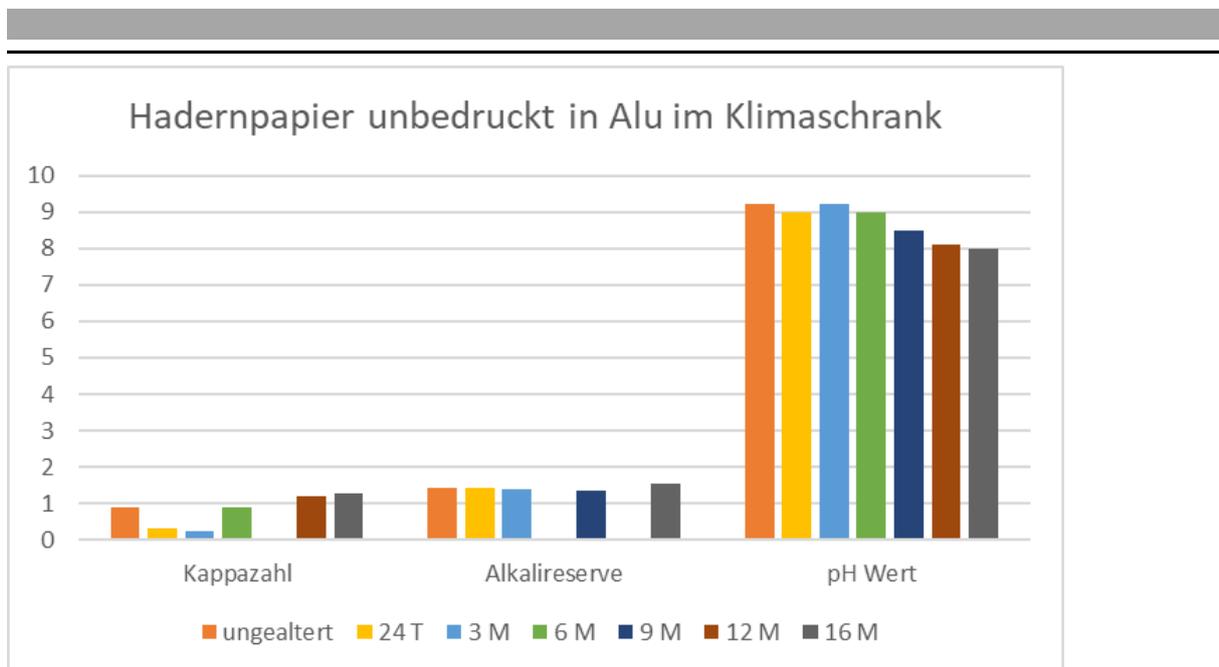


Abbildung 62 Haderpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Die Kappazahl liegt teilweise unter dem Gültigkeitsbereich der ISO 302 (< 1,0) und steigt nach 12 bis 16 Monaten in den immer noch sehr geringen, aber zuverlässig messbaren Bereich größer als 1,0. Für die Alkalireserve wurden konstant Werte um 1,4 mol/kg gemessen, auch nach 12 und 16 Monaten Lagerung. Der pH-Wert reduziert sich sukzessive von ursprünglich 9,2 nach 16 Monaten moderat auf 8,0. Zusammen mit der konstanten Alkalireserve sind hier die Voraussetzungen für ein alterungsbeständiges Papier gegeben.

Büropapiere (Kopierpapier, Inkjet-Papier, Recyclingkopierpapier)

Aufgrund der ähnlichen Eigenschaften sollen die drei Büropapiere mit den Bezeichnungen Kopierpapier, Inkjet-Papier und Trendwhite (Recyclingkopierpapier) zusammen betrachtet werden. In Tabelle 31 sind die chemischen Parameter der drei ungealterten Papiere gegenübergestellt.

Tabelle 31 Übersicht über chemische Parameter der drei Büropapiere (ungealtert)

Papier	Kappazahl	Alkalireserve	pH-Wert
Kopierpapier ISO 9706	1,5	5,4	10,0
Inkjet-Papier	1,8	4,5	8,9
Recyclingkopier-Papier „Trendwhite“	34,7	3,2	9,0

Sowohl das Kopierpapier als auch das InkJet-Papier erfüllen die chemischen Anforderungen an alterungsbeständige Papiere, wobei das Kopierpapier durch den hohen pH-Wert bezüglich der Alterungsbeständigkeit Vorteile aufweist. Die Alkalireserve ist bei allen drei Büropapieren hoch, auch bei diesem Parameter weist das Kopierpapier Vorteile auf. Die Kappazahl ist beim Kopierpapier und beim Inkjet-Papier gering. Das Recyclingkopierpapier enthält durch seinen Anteil an rezyklierten Fasern höhere Konzentrationen an oxidierbaren Stoffen, was sich durch

die deutlich höhere (und damit zu hohe) Kappazahl bemerkbar macht. In Abbildung 63 sind die Änderungen der chemischen Parameter bei der Lagerung im Klimaschrank (80 °C/65 % Luftfeuchte) dargestellt.

Das Kopierpapier (oben links in der Abbildung) zeigt eine moderate Reduzierung des pH-Wertes innerhalb der 16 Monate von 10,0 auf 8,6 und liegt damit immer noch auf einem hohen Niveau für die Langzeitstabilität. Auch ist die Alkalireserve nur minimal gesunken und liegt auch nach 16 Monaten immer noch auf einem sehr hohen Wert von 5,1 mol/kg. Die Kappazahl zeigt einen Anstieg (nach dem Ausreißer bei 9 Monaten) auf einen Wert von knapp 6, auch bei diesem Papier finden demnach Zersetzungsreaktionen statt, die zu einem höheren Anteil an oxidierbaren Verbindungen im Papier führen. Beim Inkjet-Papier (in Abbildung 63 oben rechts) ist diese Erhöhung der Kappazahl noch ausgeprägter, die Alkalireserve und der pH-Wert liegen nach 16 Monaten auf vergleichbarem Niveau wie beim Kopierpapier.

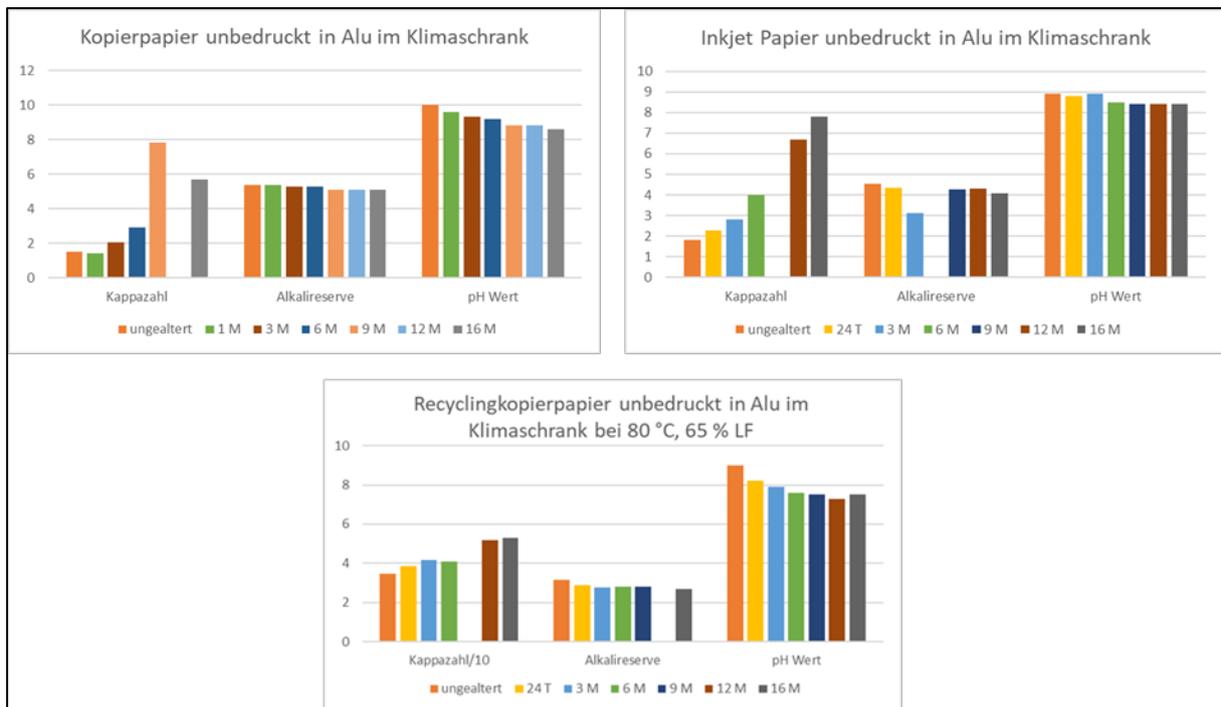


Abbildung 63 Büropapiere – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Das Recyclingkopierpapier (unten Mitte) ist durch seine hohe Kappazahl (man beachte die Bezeichnung Kappazahl/10 an der x-Achse) bezüglich seiner Alterungsbeständigkeit deutlich kritischer zu bewerten. Nach kontinuierlichem Anstieg über die Lagerungsdauer ist die Kappazahl des Recyclingkopierpapiers von 35 nach 16 Monaten auf 53 angestiegen. Die Alkalireserve hat nach 16 Monaten um ca. 15 % auf 2,7 abgenommen, der pH-Wert ist im gleichen Zeitraum von 9,0 auf 7,5 in den neutralen Bereich gesunken, so dass dieses Papier bei einer längeren Lagerung die deutlichsten Veränderungen ins Negative zeigt.

Mit dem Kopierpapier wurden weitere Lagerungsvarianten untersucht. Abbildung 64 zeigt die Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 % °C. Im Vergleich zur Lagerung des Kopierpapiers in Alu bei 80 °C/65 LF sind Kappazahl und Alkalireserve in den geschlossenen Gefäßen stabiler, allerdings sinkt der pH-Wert stärker ab, verbleibt dann aber konstant auf diesem Niveau von ca. 8,1.

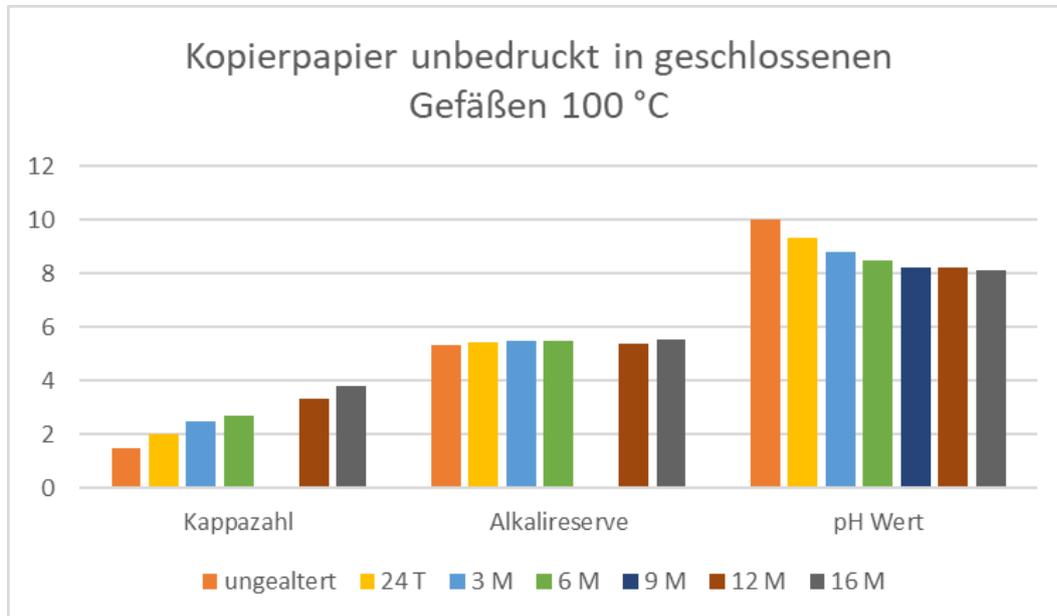


Abbildung 64 Kopierpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen)

In Abbildung 65 ist ein Vergleich verschiedener Lagerungsbedingungen nach 6 Monaten dargestellt. Auffallend ist dabei, dass die gekühlt gelagerte Probe in allen drei Parametern auf dem gleichen Niveau liegt wie die ungealterte Probe, während bei den anderen Lagerungsarten (in Alu verpackt bei 80 °C, 65 % LF und geschlossenes Gefäß bei 100 °C) nach 6 Monaten bereits deutlich die Folgen der chemischen Abbauprozesse erkennbar sind.

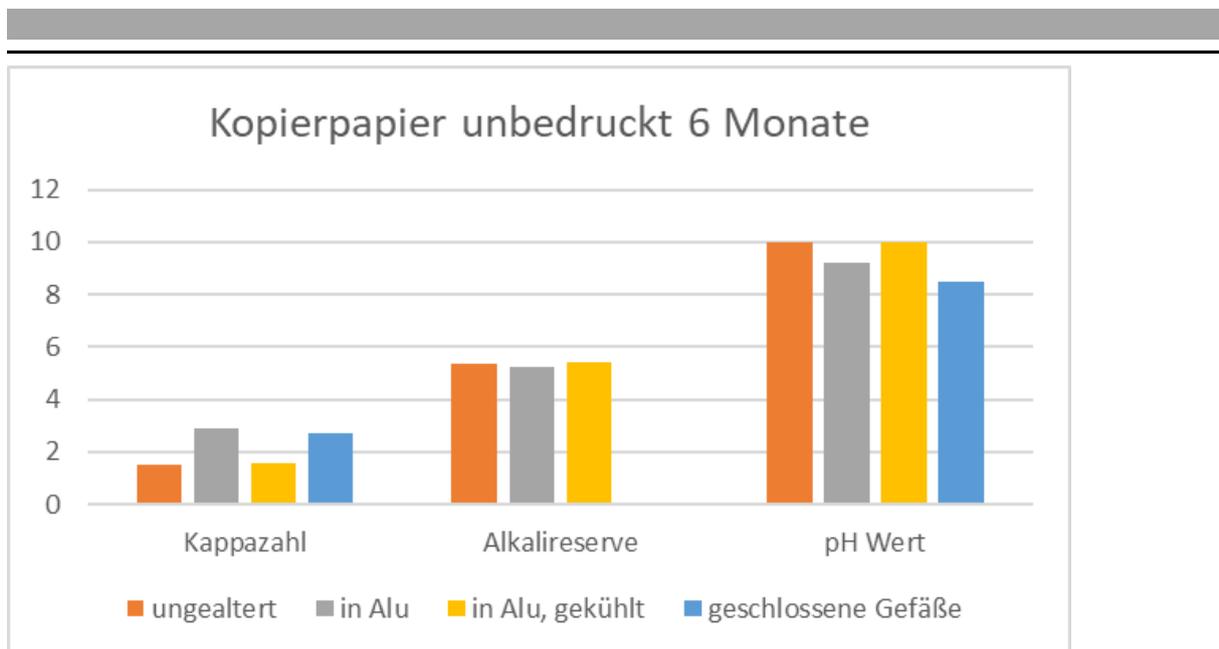


Abbildung 65 Kopierpapier – Vergleich unterschiedlicher Lagerungsbedingungen auf die chemischen Parameter nach 6 Monaten

Bibeldruckpapier

Das Bibeldruckpapier (ligninfrei) weist mit einer Kappazahl von 1,6, einer Alkalireserve von 4,2 mol/kg und einem pH-Wert von 9,6 sehr gute Werte für ein alterungsbeständiges Papier auf. In Abbildung 66 ist der Einfluss der beschleunigten Alterung bei 80 °C, 65 % LF dargestellt. Der Anstieg der Kappazahl von 1,6 auf 3,4 innerhalb der 16 Monate ist sehr moderat, der pH-Wert verringert sich im gleichen Zeitraum von 9,6 auf 8,8 und damit ebenfalls nicht so stark. Die Alkalireserve bleibt auf einem konstant hohen Niveau von 4,2 mol/kg. Aus Sicht der chemischen Parameter ist das Papier für eine längere Lagerung sehr gut geeignet.

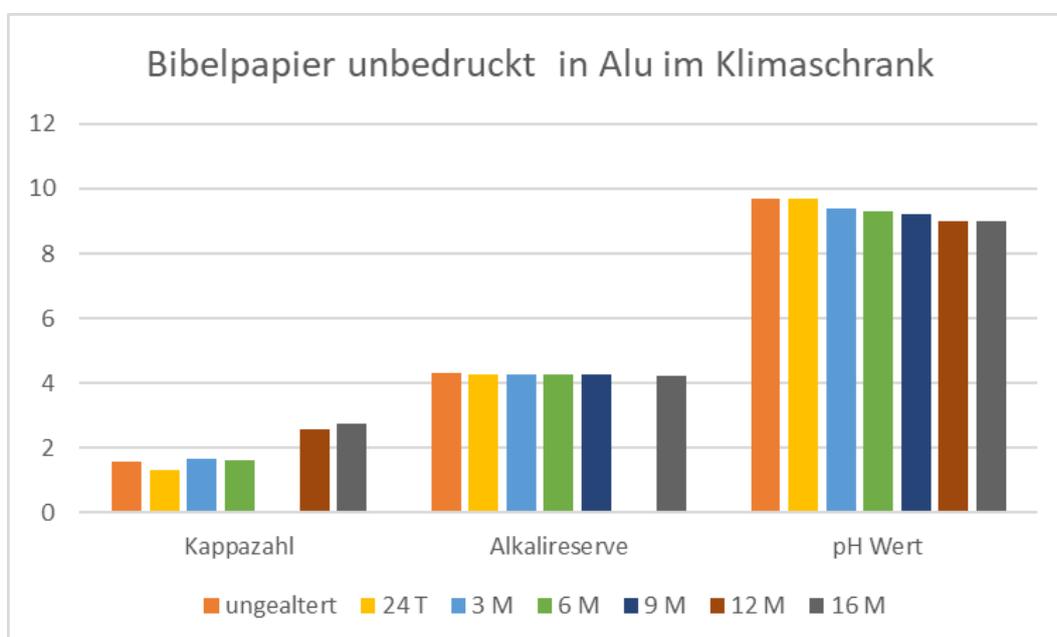


Abbildung 66 Bibeldruckpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Holzhaltiges Papier, ungestrichen und gestrichen (ligninhaltig)

Die beiden Muster „holzhaltig, ungestrichen“ und „holzhaltig, gestrichen“ unterscheiden sich bereits im ungealterten Zustand grundlegend in der Kappazahl und in der Alkalireserve. Das gestrichene Muster weist mit einer Alkalireserve von 7,59 mol/kg einen nahezu doppelt so hohen Wert auf wie das ungestrichene Muster. Offensichtlich ist in der Strichrezeptur ein hoher Anteil an Calciumcarbonat enthalten. Die Kappazahl ist in der gestrichenen Probe mit ca. 20 nur halb so groß wie im ungestrichenen Papier. Das lässt sich dadurch erklären, dass im Strich ein geringerer Anteil von oxidierbaren Stoffen enthalten ist als in der Masse des holzhaltigen Papiers (Es wird ja immer eine konstante Gesamtmasse der Probe für die Untersuchung eingewogen). In beiden Parametern hat das gestrichene Papier also die besseren Werte für eine Langzeitstabilität, allerdings ist der Ausgangswert für die Kappazahl mit ca. 20 auch bei dem gestrichenen Papier schon zu hoch. Interessanterweise haben beide Papiere in ungealtertem Zustand einen vergleichbaren pH-Wert von 9,2, der nach 16 Monaten bei 80 °C/65 % LF auf 8,2 (gestrichenes Papier) bzw. 7,9 (ungestrichenes Papier) abfällt (siehe Abbildung 67).

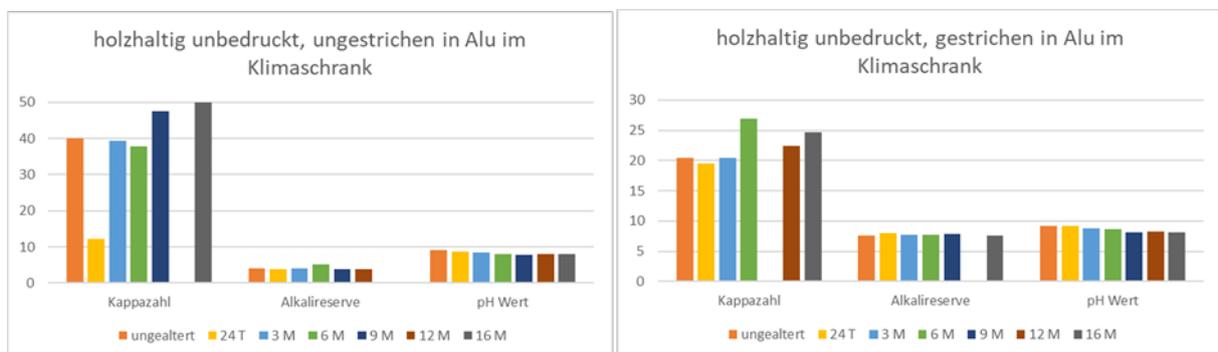


Abbildung 67 Holzhaltig unbedruckt – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Holzfreies Papier, gestrichen

Die Ausgangswerte für das holzfreie gestrichene Papier sind mit einer hohen Alkalireserve von 9,76 mol/kg und einem pH-Wert von 9,8 sehr gut geeignet, allerdings ist die Kappazahl von 6,6 gegenüber der Forderung der ISO 9706 (Kappazahl < 5,0) etwas zu hoch.

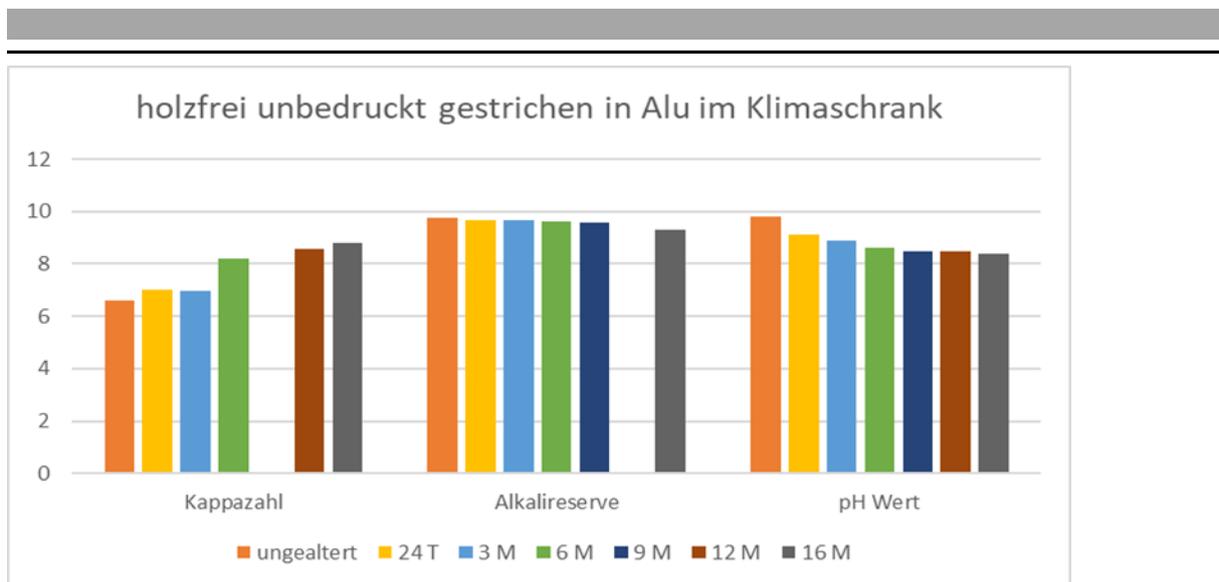


Abbildung 68 holzfrei gestrichen – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Der weitere Verlauf der chemischen Parameter bei der Lagerung des Papiers bei 80 °C/65 % LF ist Abbildung 68 zu entnehmen. Die Kappazahl steigt innerhalb der Lagerungszeit von 16 Monaten moderat, aber kontinuierlich auf 8,8 an. Die Änderungen in pH-Wert (von 9,8 auf 8,4) und Alkalireserve (von 9,76 auf 9,30 mol/kg) sind auch recht gering.

Zusammenfassung

In Tabelle 32 sind die Ausgangswerte der chemischen Parameter für die Industripapiere zusammengefasst.

Tabelle 32 Übersicht über chemische Parameter aller untersuchten Industripapiere (ungealtert)

Papier	Kappazahl	Alkalireserve	pH-Wert	DIN EN ISO 9706 erfüllt
Anforderung ISO 9706	< 5,0	> 0,4 mol/kg	7,5 - 10,0	
Hadernpapier	0,9	1,4	9,2	ja
Kopierpapier ISO 9706	1,5	5,4	10,0	ja
Inkjet Papier	1,8	4,5	8,9	ja
Recyclingkopierpapier	34,7	3,2	9,0	nein
Bibeldruckpapier	1,6	4,3	9,7	ja
holzhaltig gestrichen	20,4	7,6	9,2	nein
holzhaltig ungestrichen	40,1	4,0	9,2	nein
holzfrei gestrichen	6,6	9,8	9,8	nein

Die chemischen Veränderungen der Papiere finden zwar in unterschiedlichem Ausmaß und mit unterschiedlicher Geschwindigkeit statt. Innerhalb der 16 Monate Lagerung im Klimaschrank (80 °C, 65 % LF) verändert sich der Messwert für die Alkalireserve nur geringfügig. Der pH-Wert sinkt innerhalb dieses Zeitraums um ca. 1 bis 2 pH-Einheiten, wobei bei den Papieren, die die ISO 9706 erfüllen, auch nach 16 Monaten noch ein pH-Wert von mindestens 8,0 vorliegt. Bei zwei der vier Papiere, die aufgrund der chemischen Kennwerte im ungealterten Zustand als alterungsbeständig gelten, steigt die Kappa-Zahl aber innerhalb von 9 bzw.

12 Monaten bei der beschleunigten Alterung bei 80 °C/65 % LF auf Wert oberhalb von 5 an (Kopierpapier, Inkjet-Papier). Dagegen halten das Hadernpapier und das Bibeldruckpapier auch nach 16 Monaten noch eine geringe Kappazahl unter 3 und sind daher von den untersuchten Industripapieren auf Basis der chemischen Parameter die beiden Papiere, die am besten für eine Lagerung geeignet sind.

Industriepapiere, bedruckt

In den folgenden Abbildungen sind Beispiele dargestellt, die den Einfluss der Druckfarbe auf die chemischen Parameter bei der Lagerung von Papieren illustrieren. Abbildung 69 zeigt den Verlauf der chemischen Kennwerte von unbedrucktem Bibelpapier im Vergleich zum Tiefdruck bedruckten Papier (nur schwarze Farbe). Die Alkalireserve und der pH-Wert sind im ungealterten Zustand nahezu identisch und auch der zeitliche Verlauf bei der beschleunigten Alterung ist vergleichbar. Die Kappazahl ist in den beiden Proben im ungealterten Zustand gleich, allerdings steigt die Kappazahl bei der beschleunigten Alterung in der bedruckten Probe etwas schneller bzw. höher.

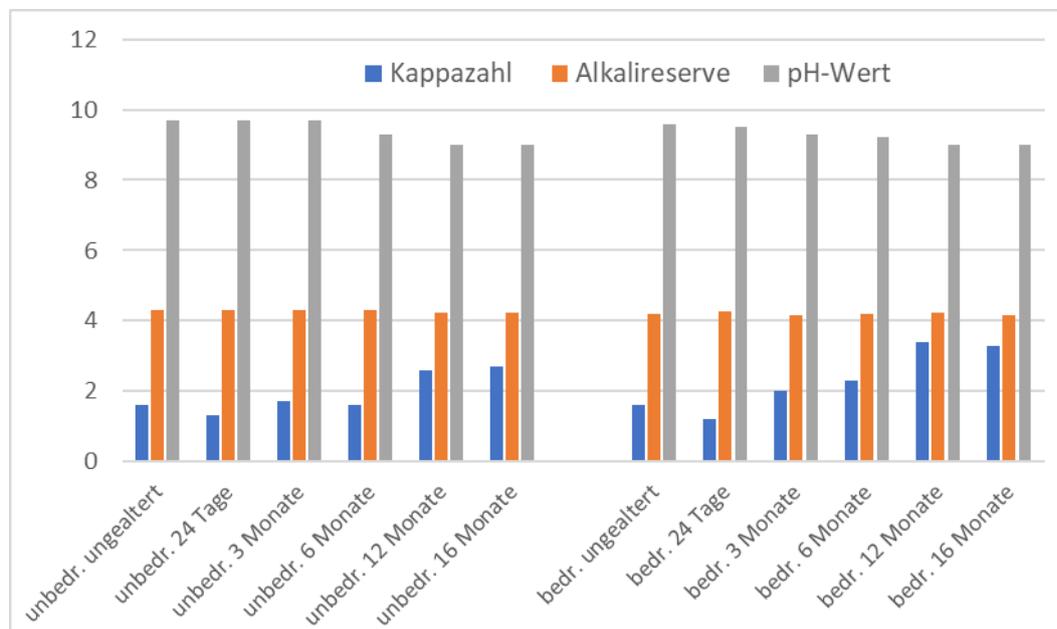


Abbildung 69 Vergleich chemische Parameter Bibeldruckpapier unbedruckt und mit schwarzem Tiefdruck bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Der in Abbildung 70 dargestellte Vergleich des unbedruckten und mit Trockentoner bedruckten Kopierpapiers zeigt eine gute Übereinstimmung für den Verlauf der chemischen Kennwerte. Auch hier ist die etwas stärkere Erhöhung der Kappazahl in der bedruckten Probe erkennbar.

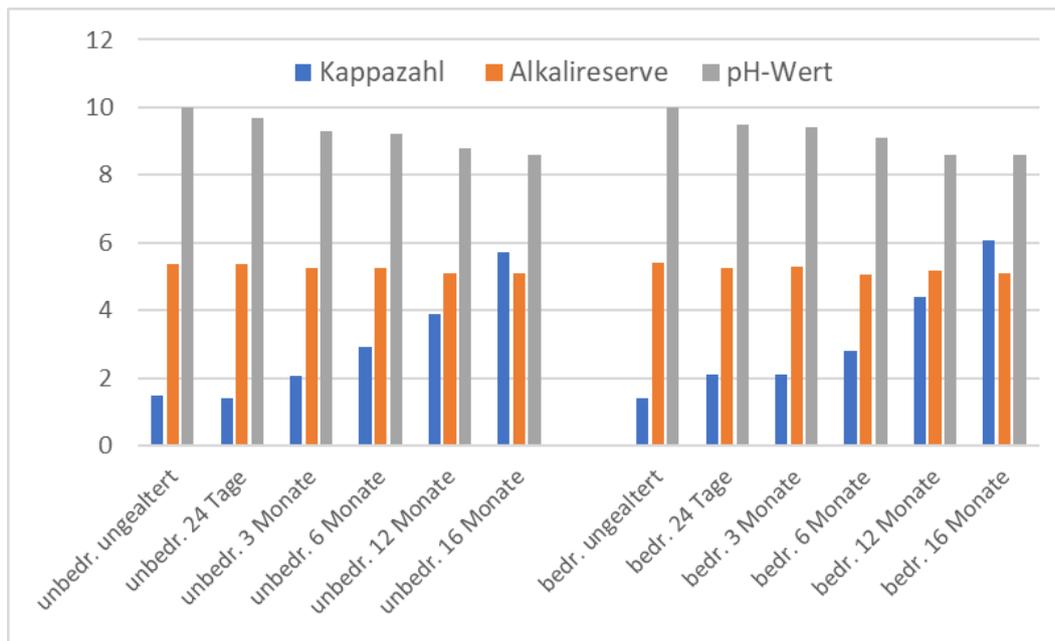


Abbildung 70 Vergleich chemische Parameter Kopierpapier ISO 9706 konform unbedruckt und mit Trockentoner bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Erstaunlicherweise ist das Phänomen der unveränderten Messwerte für Alkalireserve und pH-Wert im Laufe der beschleunigten Alterung sowie der etwas stärkere Anstieg des Kappazahl in dem bedruckten gegenüber dem unbedruckten Muster in zahlreichen Kombinationen aus Papier und Druckfarbe erkennbar (siehe auch Abbildung 71 für offset bedrucktes, holzfreies, gestrichenes Papier). Durch den Auftrag von organischen Stoffen mit der Druckfarbe, die unter den Bedingungen der Bestimmung der Kappazahl mit oxidiert werden können, ist diese Beobachtung durchaus plausibel. Dass diese höhere Konzentration an oxidierbaren Stoffen (siehe auch Kapitel 4.4.4.2) einen Einfluss auf eine schnellere Alterung des bedruckten Papiers hat, kann daraus nicht abgeleitet werden.

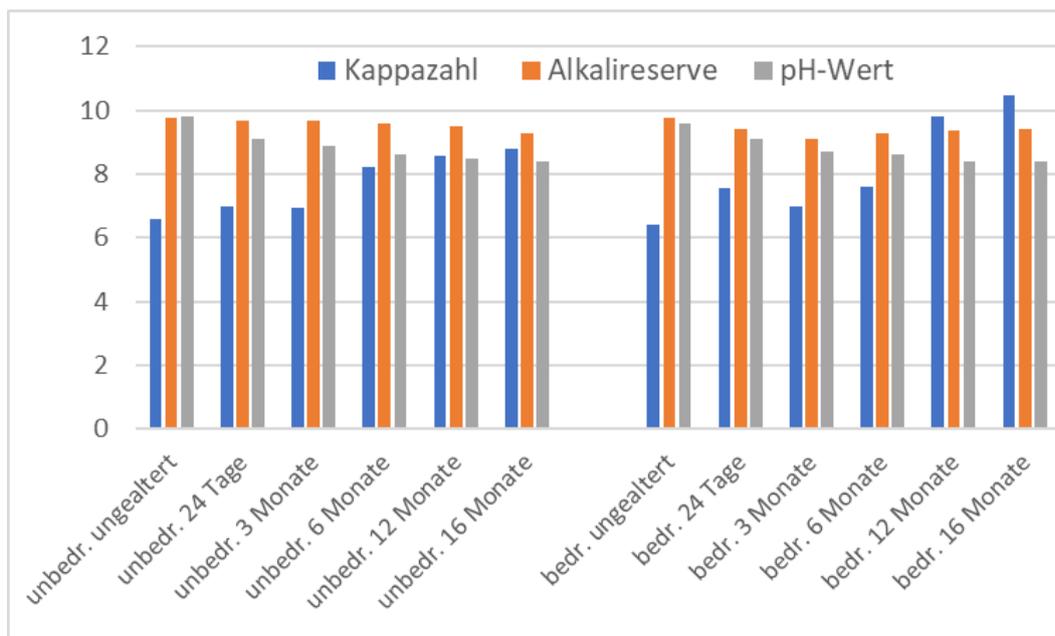


Abbildung 71 Vergleich chemische Parameter holzfrei, gestrichenes Papier unbedruckt und mit Offset bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF)

Sondersorten

Auffällig an den Sondersorten ist vor allem, dass trotz der langen natürlichen Alterung bei der beschleunigten Alterung noch chemische Prozesse initiiert werden. Dies mag als Hinweis darauf dienen, dass bei einer künstlichen Alterung bei 80 °C Reaktionen aktiviert werden, die bei niedrigeren Temperaturen nicht ablaufen. Die künstliche Alterung wäre somit zu scharf.

Tabelle 33 Übersicht über chemische Parameter der Sondersorten

	Kap-pazahl	Alkalire-serve in mol/kg	pH-Wert
Signa Set rot, ungealtert	48,68	3,13	8,4
Signa Set rot, 12 Tage in Alu bei 80°C/65 % LF	54,41	3,07	8,0
Technische Zeichnung transparent, ungealtert	0,9	< 0,01	6,3
Technische Zeichnung transparent, 12 Tage in Alu bei 80°C/65 % LF	0,9	< 0,01	5,5
Blaupause, ungealtert	1,5	3,14	9,5
Blaupause, 12 Tage in Alu bei 80°C/65 % LF	2,2	3,05	9,4

4.4.4.2 Volatile Organic Compounds (VOC)

Die Messung der flüchtigen organischen Stoffe (VOC) wurde im vorliegenden Projekt auf der Grundlage der Messvorschrift der RAL-UZ 14 „Recyclingpapier“ Anhang 4 in der Fassung von 2014 durchgeführt (RAL-UZ 14 Anhang 4). Bei dieser Bestimmungsmethode werden die flüchtigen Stoffe in einem Desorptionsröhrchen aus einem Prüfstück definierter Größe im Heliumstrom bei 180 °C über einen Zeitraum von 5 min ausgetrieben, in einer Kühlfalle mit flüssigem Stickstoff aufgefangen und angereichert und danach automatisch in den Gaschromatographen

injiziert und massenspektrometrisch vermessen und ausgewertet. Die Größe des Prüfstücks ist mit ca. 3 mm x 60 mm vorgesehen, die Masse des Prüfstücks in Thermodesorptionsröhrchen soll 13 ± 1 mg betragen.

In dieser Prüfmethode werden die flüchtigen Stoffe in die leicht flüchtigen VOC und die „mittelschwer“ flüchtigen SVOC eingeteilt (Semi Volatile Organic Compounds – SVOC). Die Unterscheidung erfolgt auf der Grundlage der Retentionszeiten im Gaschromatogramm, die durch die Kettenlänge der n-Alkane vorgegeben wird (C10 Hexan bis C16 Hexadecan = VOC, C16 Hexadecan bis C25 Pentacosan = SVOC). In Abbildung 72 ist ein typisches Chromatogramm eines Recyclingkopierpapiers mit den unterschiedlichen Bereichen für VOC und SVOC dargestellt. Die quantitative Auswertung erfolgt dann über die Peakflächen (integriert über die Basislinie des Chromatogramms), allerdings nicht als Direktmessung, sondern im Verhältnis zur Peakfläche von Toluol, das als Kalibrierstandard eingesetzt wird. Daraus resultieren die Messwerte TVOC und TSVOC, die in der RAL-ZU 14 in der Fassung von 2014 mit 60 bzw. 200 $\mu\text{g/g}$ für den Erhalt des Blauen Engels limitiert waren.

Im vorliegenden Projekt sind aufgrund des hohen Messaufwandes nicht alle Papier- und Faserstoffproben aus den unterschiedlichen Lagervarianten und –zeiträumen gemessen worden. Für die Bestimmung der VOC-/SVOC-Stoffe ist die Lagerung in dicht geschlossenen Aluminium-Verpackungen unbedingt erforderlich, um keine oder nur akzeptabel geringe Verluste an Stoffen durch die Lagerung zu bekommen. Zu Beginn des Projektes wurden zunächst die Faserstoffproben (Linters, NBSK, CTMP) ungealtert (jeweils 3 Prüfstücke) und nach 6 Monaten Lagerung im Kühlraum und bei 80 °C/65 LF untersucht.

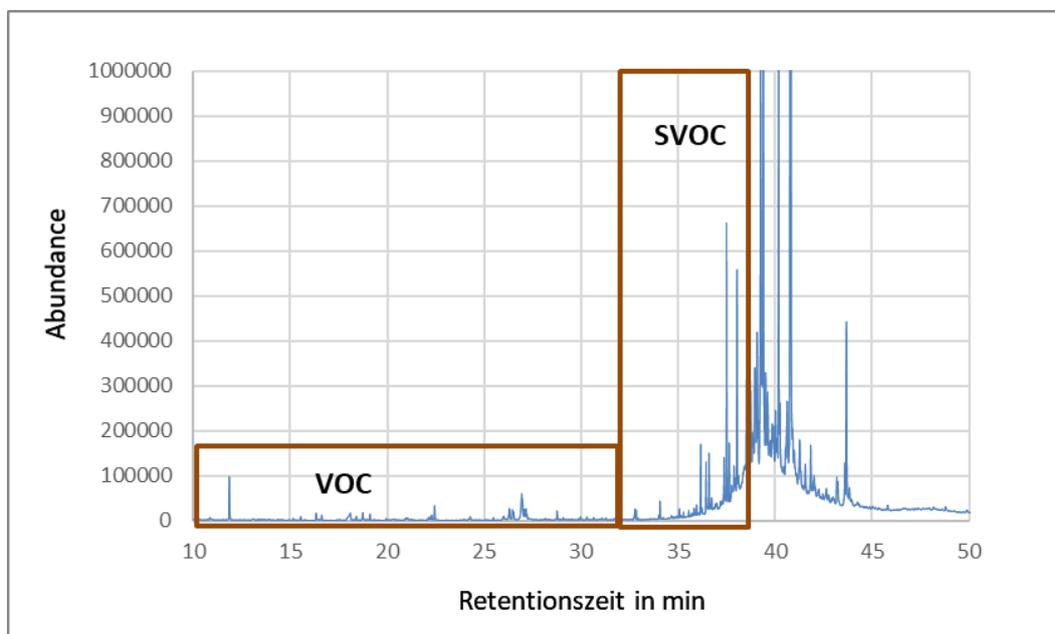


Abbildung 72 Total-Ionenchromatogramm holzhaltig natur, Offset bedruckt, ungealtert mit Angabe des VOC- und des SVOC-Bereiches

Faserstoffe/Laborblätter

In Abbildung 73 sind die VOC- und SVOC-Konzentrationen der drei verschiedenen Faserstoffe sowohl im ungealterten Zustand als auch nach 6 Monaten Lagerung dargestellt. NBSK weist im ungealterten Zustand die geringste Konzentration an VOC- und SVOC-Stoffen auf, deren Werte durch die 6monatige Lagerung auch nur unwesentlich ansteigen. Beim Linters ist nach 6monatiger Lagerung eine Erhöhung der Konzentration bei den SVOC-Werten (steigen bei 80 °C/65 LF deutlich stärker als im Kühlraum) zu verzeichnen. Die leichter flüchtigen VOC-Stoffe nehmen dagegen nach 6monatiger Lagerung im Kühlraum ab, bei 80 °C/65 % LF dagegen zu. Beim CTMP sind in den gelagerten Proben geringere Konzentrationen an SVOC-Stoffen messbar als bei der ungealterten Probe. Die Konzentration an VOC-Stoffen wird dagegen bei 6monatiger Lagerung höher. Insgesamt sind die Messungen begrenzt aussagefähig. Um sinnvolle und vergleichbare Messwerte bei der doch sehr begrenzten Größe der Prüfstücke (3 mm x 60 mm, ca. 13 mg) und den geringen VOC-/SVOC-Konzentrationen der Frischfasermaterialien zu erhalten, müssen die Papier-/Faserstoffproben sehr homogen sein. Durch die Prozesse der Laborblattbildung ist diese Homogenität (insbesondere auch im Hinblick auf eine konstante flächenbezogene Masse über den gesamten Laborblattquerschnitt) möglicherweise nicht reproduzierbar zu erreichen, so dass die Schwankungen innerhalb der drei Prüfstücke einer Probe in einigen Fällen hoch sein können.

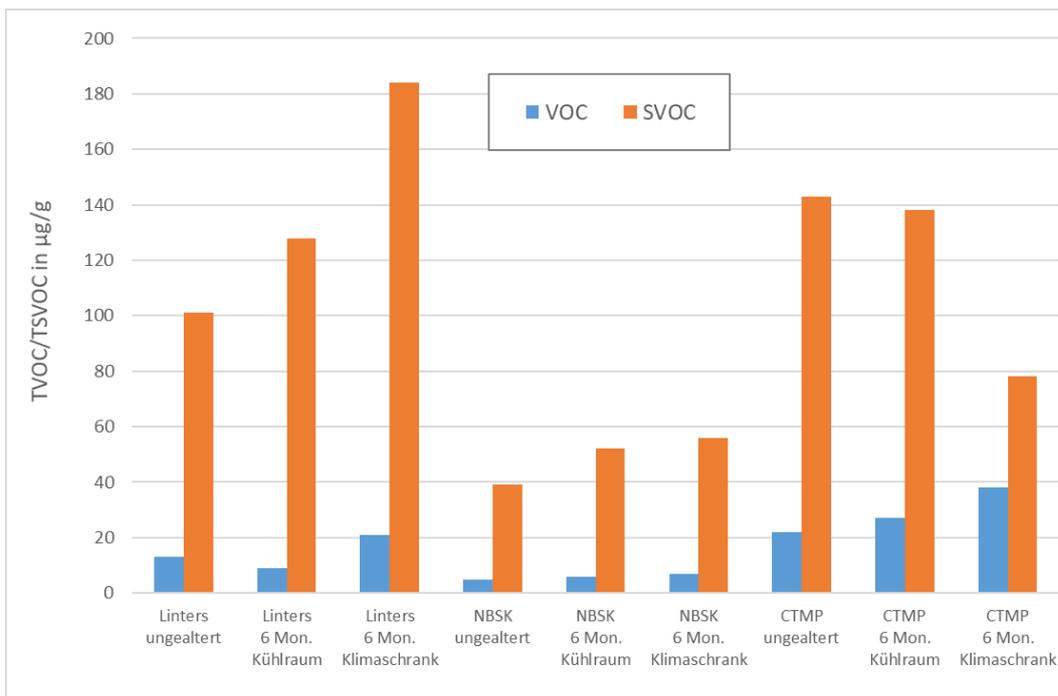


Abbildung 73 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Faserstoffproben (ungealtert sowie nach 6 Monaten Lagerung im Kühlraum bei 4 °C und bei 80 °C/65 % LF)

Industriepapiere, unbedruckt

In Abbildung 74 sind die Messwerte für die unbedruckten ungealterten Industriepapiere enthalten. Die Konzentrationen an VOC-/SVOC-Stoffen sind bei den Industriepapieren mit TVOC-Konzentrationen zwischen 1 und 8 µg/g (im Vergleich zu 3 bis 22 µg/kg bei den Faserstoffen) auf deutlich geringerem Niveau. Dies könnte u. a. mit der unterschiedlichen Trocknung der Laborblätter im Vergleich zu den Industriepapieren zusammenhängen, aber auch mit der Zeitdauer, die die Papiere vor der Verpackung in Aluminiumfolie bereits gelagert wurden. Die Industriepapiere sind bis zur Verpackung und Einlagerung deutlich länger unter Umgebungsbedingungen beim Produzenten, Transport etc. gelagert wurden als die Laborblätter, die am PMV zumeist direkt nach ihrer Trocknung dicht in Aluminiumfolie eingepackt wurden und damit kaum Gelegenheit hatten, die flüchtigen organischen Stoffe an die Umgebung abzugeben.

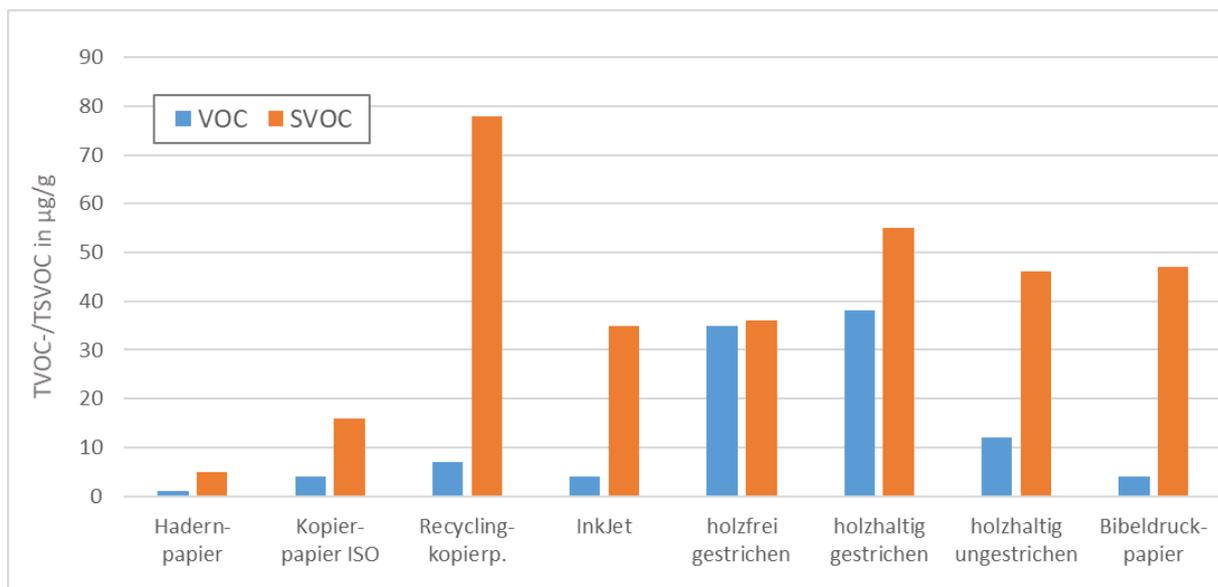


Abbildung 74 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Industriepapieren (ungealtert, unbedruckt)

Auffallend ist der hohe TSVOC-Gehalt im Recyclingkopierpapier, der im Wesentlichen aus den Mineralölen der Druckfarben im Altpapierkreislauf resultieren dürfte. Der höhere Gehalt an VOC-Stoffen im holzfrei gestrichenen und holzhaltig gestrichenen Papier ist wahrscheinlich ein Ergebnis der Stoffe, die aus der Streichfarbenrezeptur stammen.

Im Folgenden wurde der Verlauf der VOC-/SVOC-Konzentration während der Lagerung des unbedruckten Papiers bei 80 °C/65 % LF am Beispiel des Recyclingkopierpapiers untersucht (siehe Abbildung 75). Dabei ist über die Lagerungsdauer kein einheitlicher Trend zu verzeichnen. Die Konzentration an leichter flüchtigen VOC-Stoffen nimmt in dem Recyclingkopierpapier erst stark zu und fällt nach 16 Monaten wieder ab. Bei den SVOC-Stoffen ist die Konzentration in den ersten Monaten am höchsten und nimmt danach ab. Nach 16 Monaten ist die Konzentration an SVOC-Stoffen am geringsten. Eine plausible Erklärung für diesen Verlauf gibt es zunächst nicht. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die am Anfang im Papier

vorhandenen flüchtigen Stoffe mit zunehmender Lagerung immer mehr aus dem Papier ausgasen. Dieser Effekt sollte bei den stärker flüchtigen organischen Stoffen (VOC) höher sein als bei den mittelschwer flüchtigen organischen Stoffen (SVOC). Allerdings ist der Dampfdruck der SVOC-Stoffe unter den Bedingungen bei 80 °C/65 % LF auch schon sehr hoch. Die Stoffe kommen allerdings aus der Aluminiumverpackung, in der sie gelagert sind, nicht in nennenswerten Mengen heraus. So stellt sich in der verpackten Probe ein Gleichgewicht ein, das zunächst durch den Temperaturrückgang beim Entnehmen der verpackten Proben aus dem Klimaschrank in das Standard-Laborlima verschoben und bei der Öffnung der verpackten Proben und Vorbereitung der Messung aufgehoben wird. Die in Abbildung 75 gemessenen Werte sind dann das Resultat dieser komplexen Vorgänge. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen den VOC-/SVOC-Werten und den weiteren chemischen Parametern bzw. den Festigkeitswerten zu den jeweiligen Zeitpunkten scheint nicht zu existieren. In dem untersuchten Zeitraum steigt die Kappazahl als Maß für die Konzentration der oxidierbaren Stoffe in den gelagerten Recyclingkopierpapier-Proben kontinuierlich an. Allerdings dürfte nur ein sehr kleiner Anteil dieser oxidierbaren Stoffe flüchtig sein.

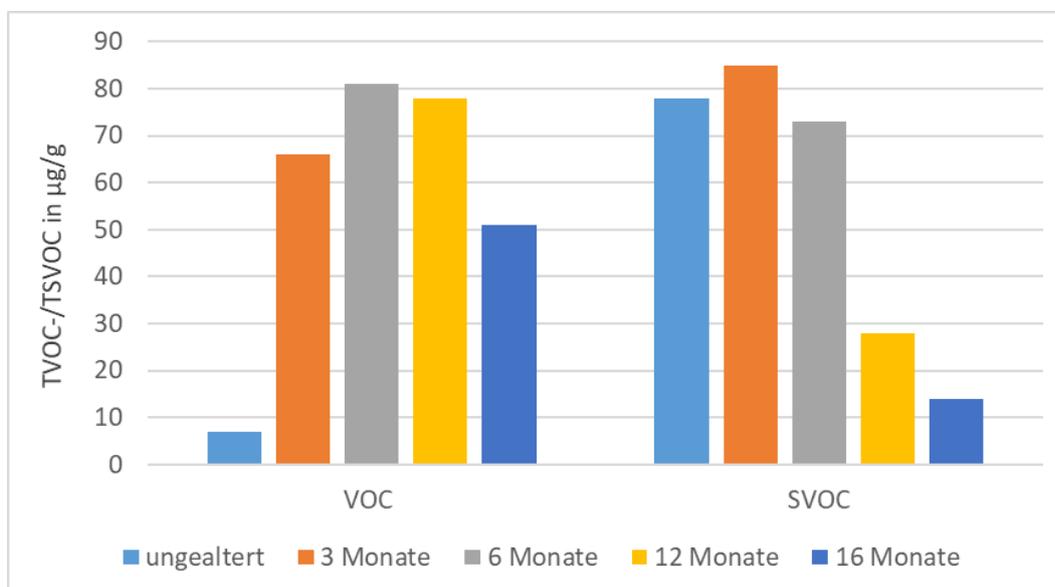


Abbildung 75 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Recyclingkopierpapier (unbedruckt) während der Lagerung im Klimaschrank (80 °C/65 % LF)

Industriepapiere, bedruckt

Zunächst wurden die bedruckten ungealterten Industriepapiere auf ihren VOC-/SVOC-Gehalt untersucht. Die Messungen sind in Abbildung 76 zusammengefasst. Die unterschiedlichen Papiersorten sind jeweils durch senkrechte schwarze Linien abgeteilt. Für jede Papiersorte ist jeweils links das Muster ohne Druckfarbe dargestellt, daneben die mit unterschiedlichen Druckverfahren und –farben bedruckten Muster.

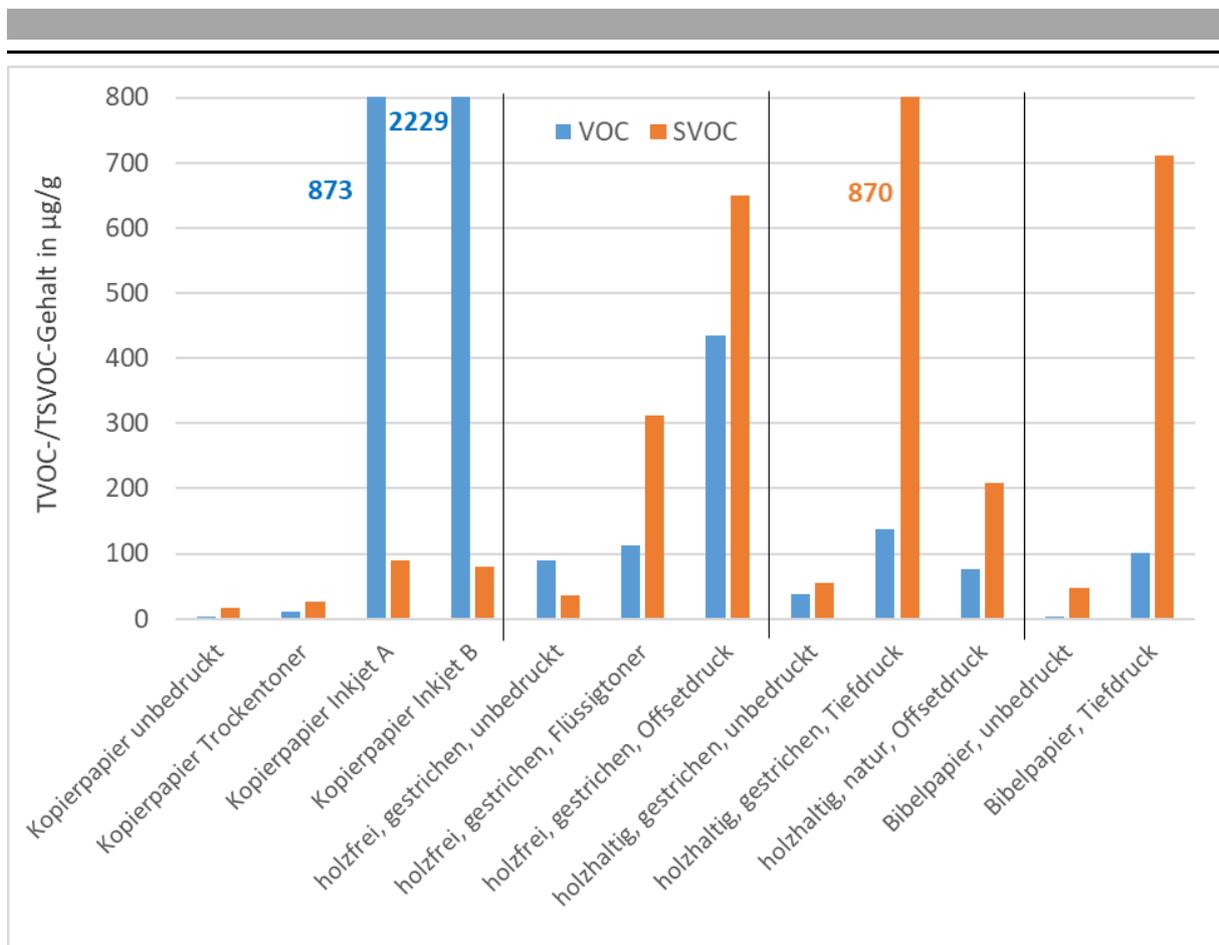


Abbildung 76 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in bedruckten Industriepapierproben (ungealtert)

Der Einfluss der Druckfarbe auf die VOC-/SVOC-Messwerte ist deutlich erkennbar. Die bedruckten Muster weisen im Vergleich zu den unbedruckten Mustern sehr viel höhere VOC-/SVOC-Gehalte auf. Bei den Kopierpapieren (links in der Abbildung) fällt auf, dass nicht nur das unbedruckte Muster, sondern auch das Muster mit dem Trockentoner sehr wenig flüchtige organische Stoffe enthält. Hinsichtlich der flüchtigen Substanzen ist der Trockentoner somit das beste Druckverfahren. Die beiden inkjetbedruckten Muster haben dagegen ein sehr hohes Emissionspotential, insbesondere in der leicht flüchtigen VOC-Fraktion. Die Tiefdruck- und die Offsetdruckfarben enthalten sehr hohe Konzentrationen an SVOC-Stoffen.

In Abbildung 77 ist dargestellt, wie die hohe Konzentration an VOC- und SVOC-Stoffen mit der Lagerungszeit abnimmt.

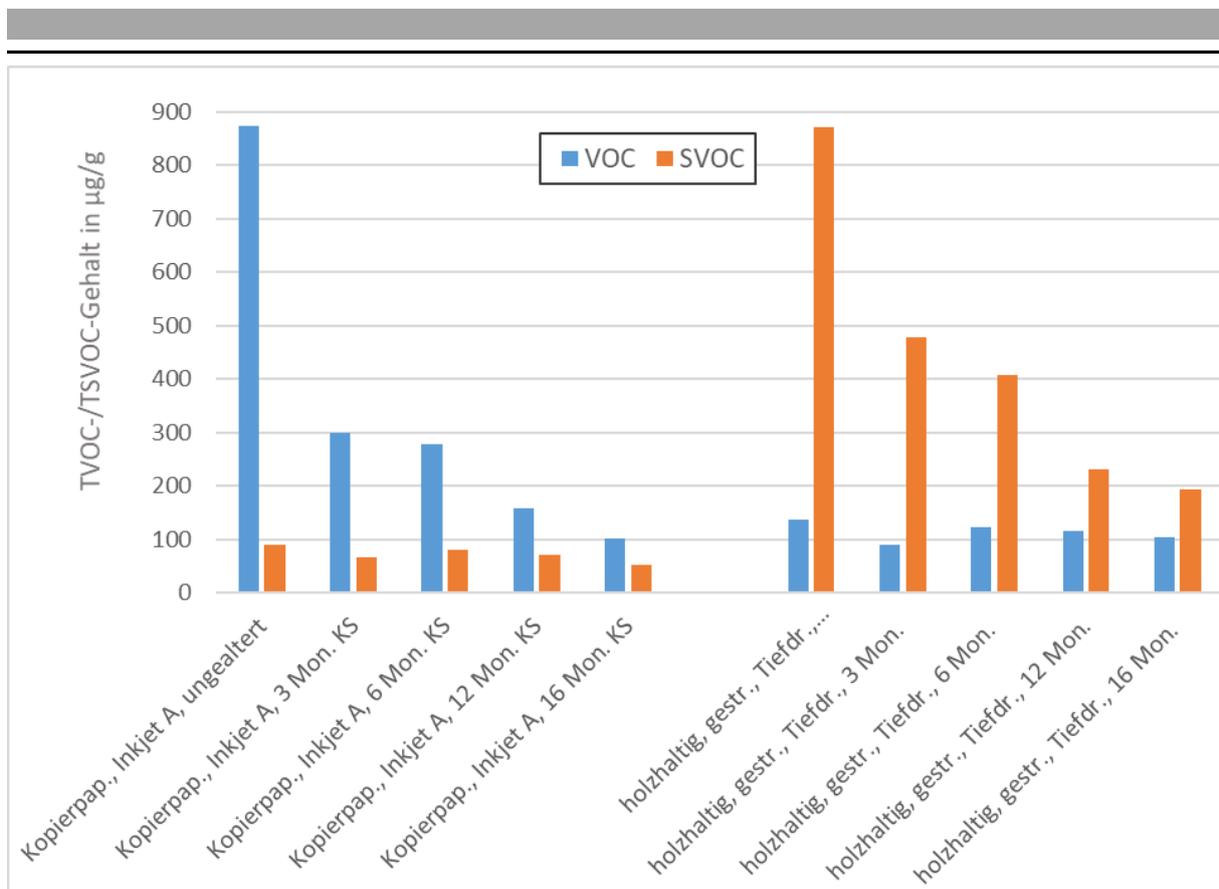


Abbildung 77 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen bei der Lagerung von bedruckten Industriepapierproben (Lagerung im Klimaschrank bei 80 °C/65 % LF)

Links ist die Kopierpapierprobe mit der Inkjetdruckfarbe A dargestellt, rechts das holzhaltige, gestrichene Papier mit Tiefdruckfarbe. Es ist zu erkennen, dass in beiden Fällen die Konzentration der flüchtigen organischen Stoffe über die Lagerungszeit von maximal 16 Monaten stark abnimmt. Dies gilt sowohl für die leichtflüchtigere VOC-Fraktion aus der Inkjetdruckfarbe (links, blaue Balken), als auch für die mittelschwer flüchtigen SVOC-Stoffe der Tiefdruckfarben (rechts, orangefarbene Balken). Die Reduzierung geht allerdings bei den leichter flüchtigen VOC schneller vorstatten. Trotz der verschärften Bedingungen bei der Alterung (Lagerung im Klimaschrank bei 80 °C und 65 % LF) sind auch nach 16 Monaten noch Restlösemittel und andere flüchtige Druckfarbenbestandteile in den Papierproben messbar. Die Konzentrationen an VOC- und SVOC-Stoffen der bedruckten Papierproben ist auch nach 16 Monaten noch nicht wieder auf dem geringen Niveau der unbedruckten Papiere. Die Differenz der VOC-/SVOC-Stoffe zwischen Anfang und Ende der Einlagerung ist dann die Menge der flüchtigen Stoffe, die aus den Druckfarben an die Umgebung, also auch an nahe gelegene andere Papiere abgegeben werden.

Im Folgenden wurde durch Vergleich der Massenfragmente im GC/MS mit den Einträgen der Spektrendatenbank gezielt nach Stoffen gesucht, die während der Lagerungszeit in größeren

Konzentrationen neu gebildet werden. Dabei sind in vielen Chromatogrammen Peaks der niedermolekularen organischen Säuren Ameisensäure, Essigsäure und Propionsäure detektiert worden. Eine Quantifizierung ist mit der vorliegenden Messmethodik allerdings nicht möglich.

Zusammenfassung

VOC-/SVOC-Stoffe aus bedruckten Papieren können sowohl aus dem Bedruckstoff Papier als auch aus der Druckfarbe stammen. Optimal sind Kombinationen, in denen aus beiden Materialien möglichst wenig Stoffe freigesetzt werden, da diese aus chemischen Reaktionen der Papierbestandteile (im Wesentlichen Zersetzung der Celluloseketten) resultieren oder chemische Reaktionen der Faserbestandteile hervorrufen oder beschleunigen können. Diese Anforderung wird papierseitig insbesondere von dem Hadernpapier als auch von dem Kopierpapier nach ISO 9706 erfüllt. Aus Sicht des geringsten Emissionspotentials ist der Trockentoner als „Schreibstoff“ ideal, da er im Vergleich zu allen anderen Druckfarben nur sehr geringe Konzentrationen an flüchtigen organischen Stoffen mitbringt. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Freisetzung an flüchtigen organischen Stoffen und den relevanten mechanischen, optischen und chemischen Parametern, die die Langzeitstabilität von Papier charakterisieren, konnte nicht festgestellt werden.

4.4.5 Auswertung der Messwertschwankungen

Neben den Mittelwerten, die für die einzelnen Parameter bestimmt werden, können auch die Schwankungsbereiche Aussagen zum Alterungsverlauf geben. Denkbar ist, dass sich die Standardabweichungen über den Alterungsverlauf erhöhen, d. h. das Papier würde in seinen Eigenschaften schwankender. Auch könnten die Schwankungen absinken, was auf eine Stabilisierung des Papiers hindeuten würden. Zudem könnten sich Anstieg und Fall abwechseln bzw. umgekehrt auch Fall und Anstieg. Nach diesen Kurvenformen wird mit Hilfe des Variationskoeffizienten gesucht. Dieser ist eine Prozentangabe, die sich aus dem Bezug der Standardabweichung einer Messung auf deren Mittelwert ergibt.

Die Papiere zeigen sich diesbezüglich sehr uneinheitlich. Manchmal scheinen Tendenzen vorzuliegen, manchmal nicht. Die folgenden Abbildungen gehen näher auf die Laborpapiere ein, um zu untersuchen, ob das Schwankungsverhalten der einzelnen Faserquelle sich unterscheidet und so bei der Empfehlung für ein abgestimmtes Papier – Schreib-/Druckstoffsystem berücksichtigt werden muss. Herangezogen werden die drei Parameter Durchreißwiderstand, Arbeitsaufnahmevermögen und Weißgrad D65 mit UV, wie an anderer Stelle auch. Hinzugefügt werden noch aus dem optischen Bereich der Absorptionskoeffizient k und der Streukoeffizient s .

Würden die Standardabweichungen betragsmäßig gleichbleiben, dann würde der Variationskoeffizient bei sinkenden Mittelwerten steigen und bei steigenden Mittelwerten sinken, da er

eine prozentuale Größe aus Standardabweichung zu Mittelwert ist. Prinzipiell ist dies in Abbildung 78 zu erkennen.

Bei den fallenden Werten Durchreißwiderstand, Arbeitsaufnahmevermögen und Weißgrad steigt der Variationskoeffizient tendenziell. Auffallend sind die hohen Schwankungen am Ende der Alterungsperiode. Zwar finden am Ende nochmals deutliche Absenkungen der Werte statt, aber auch die absoluten Messwertschwankungen nehmen zu. Dies kann darauf hindeuten, dass die gemessenen Prozesse nicht gleichmäßig überall im Papier stattfinden, sondern an manchen Stellen schon stärker, an anderen weniger stark ausgeprägt.

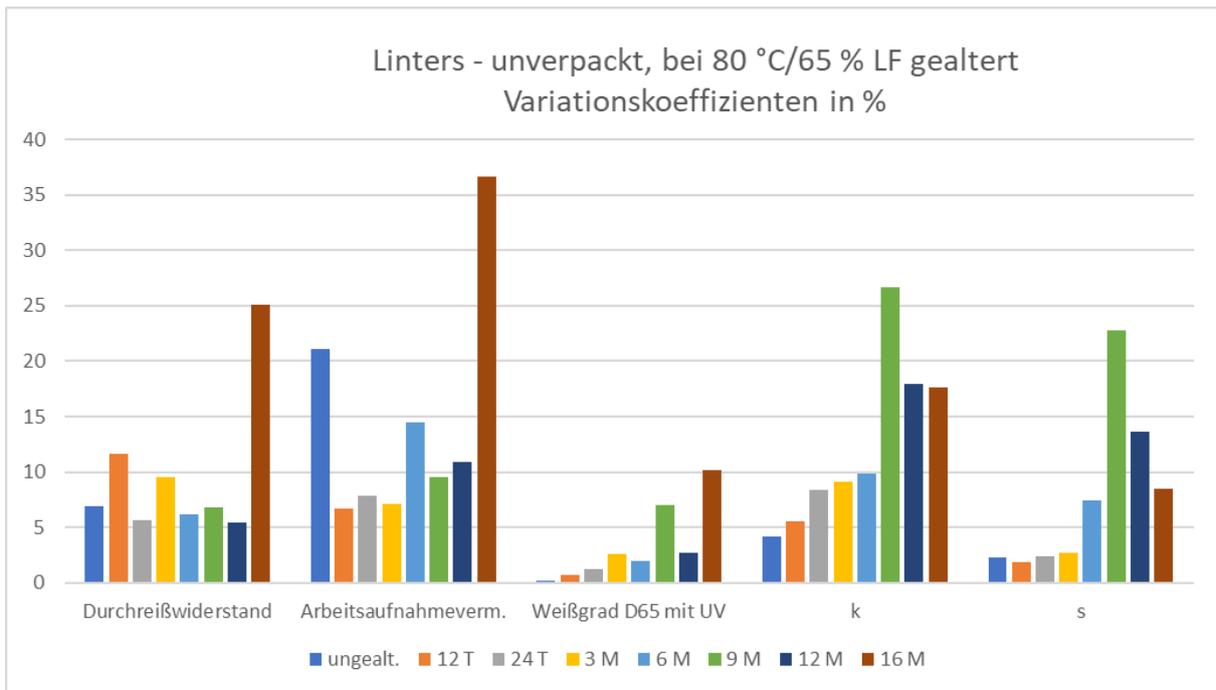


Abbildung 78 Linters – Verlauf des Variationskoeffizienten über die Alterung

Der s-Wert zeugt ab Monat 6 der Alterung stärkere Veränderungen. Ab diesem Monat beginnt der s-Wert auch sich im Mittelwert zu verändern. Bis dahin war er konstant (siehe Tabelle 10). In den Monaten 12 und 16 fällt der Mittelwert allerdings deutlich, aber auch der Variationskoeffizient. D. h., dass die beobachteten Prozesse sehr gleichmäßig im Papier abgelaufen sind.

Gleiches kann man aus dem Verlauf beim k-Wert herauslesen. Der Mittelwert des k-Werts steigt (siehe ebenfalls Tabelle 10), der Variationskoeffizient jedoch auch. D. h. die Unterschiede im Papier nehmen bezüglich dieser Eigenschaft zu. Erst nach 12 und 16 Monaten Alterung gehen die Schwankungen wieder zurück, das Papier scheint sich zu vergleichmäßigen, was auf sich verlangsamende Alterungsprozesse hindeuten kann.

Beim CTMP-Laborblatt in Abbildung 79 zeigt der Weißgrad ein höheres Schwankungsniveau an den gealterten Proben als an den ungealterten, allerdings ist der Variationskoeffizient insgesamt sehr niedrig. Optisch scheint das Blatt durch die Alterung inhomogener zu werden.

Alle anderen Kurven steigen tendenziell, was, bis auf den k-Wert wegen der fallenden Mittelwerte zu erwarten ist.

Beim k-Wert steigen die Variationskoeffizienten auch, obwohl wegen des Anstiegs der Mittelwerte (siehe Tabelle 11) eine fallende Tendenz zu erwarten wäre. Dies weist, viel deutlicher als beim Weißgrad, auf steigende optische Inhomogenität durch die Alterung hin.

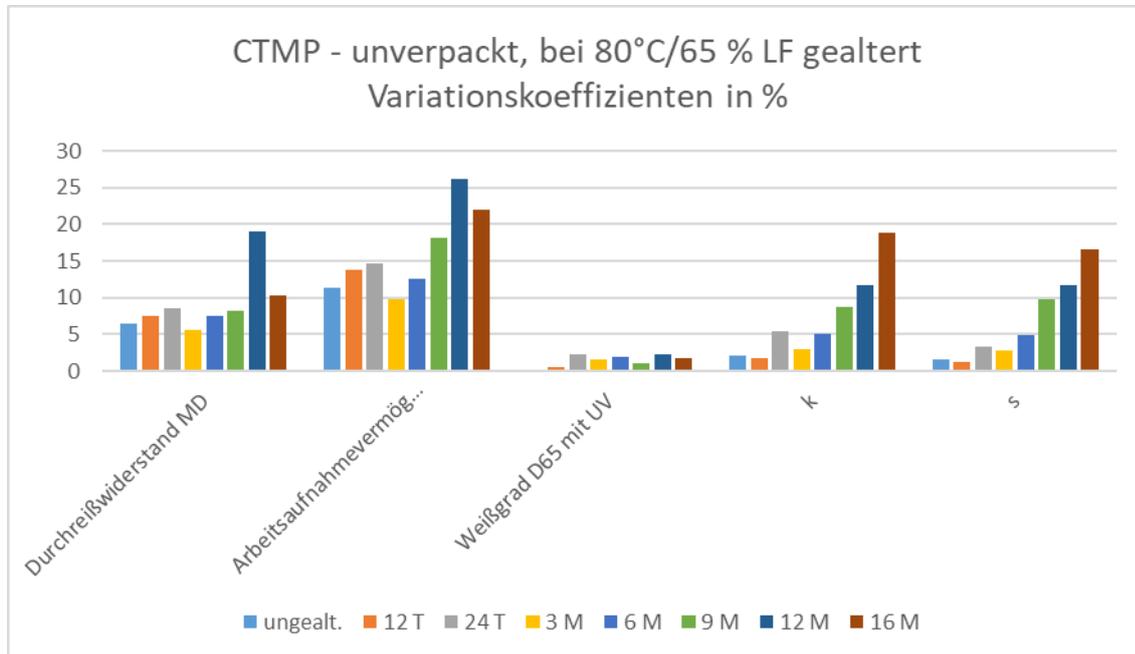


Abbildung 79 CTMP – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung

Der NBSK-Faserstoff zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Linterslaborblätter. Tendenziell steigen die Werte wie erwartet an, außer bei s und k. Wie schon bei Linters fallen die Werte gegen Ende der Alterungsperiode. Abbildung 80 zeigt auch beim Weißgrad einen Anstieg und dann wieder ein Fallen der Messwertschwankungen. Offensichtlich wird das Laborblatt aus NBSK-Zellstoff zunächst optisch inhomogen, gleicht sich aber zum Ende der Alterungslaufzeit wieder aus. Auch dies kann ein Hinweis darauf sein, dass optisch die Alterung weitestgehend abgeschlossen ist. Als Fazit kann gezogen werden, dass sich bei Linters und NBSK, also bei den holfreien Fasern, eine Stabilisierung der Messwertschwankungen im Laufe der Alterung zu verzeichnen ist. Bei CTMP ist das nicht der Fall, hier steigt die optische Inhomogenität auch nach 16 Monaten Alterung noch an.

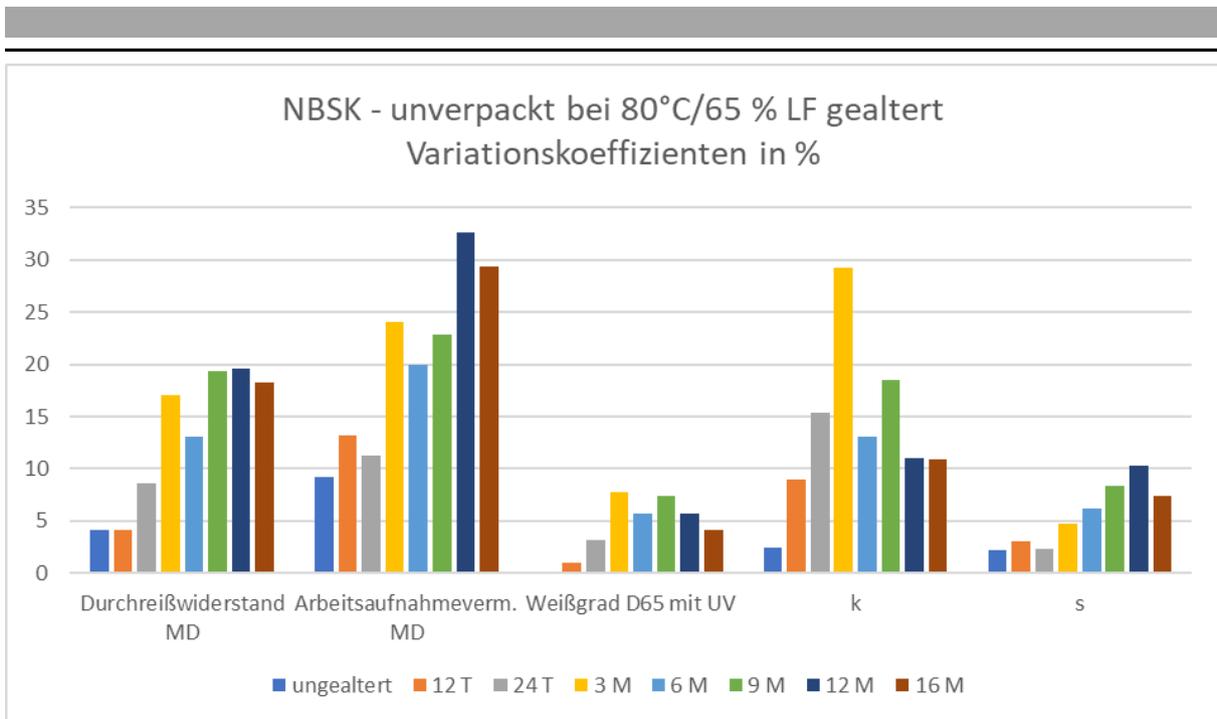


Abbildung 80 NBSK – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung

Industriepapier unbedruckt

Als Gegenpart, ob sich die getroffenen Aussagen so in den Industripapieren wiederfinden, sie beispielhaft das Recycling-Kopierpapier aufgeführt. Das ligninhaltige Industripapier zeigt ein ähnliches Verhalten wie die ligninfreien Fasern der Laborblätter. Im Gegensatz zum reinen CTMP sinken die Variationskoeffizienten für s und k nach neun Monaten künstlicher Alterung wieder. Die optische Alterung läuft auf einen Grenzwert hin, der mit fortschreitender Zeit überall im Papier erreicht wird.

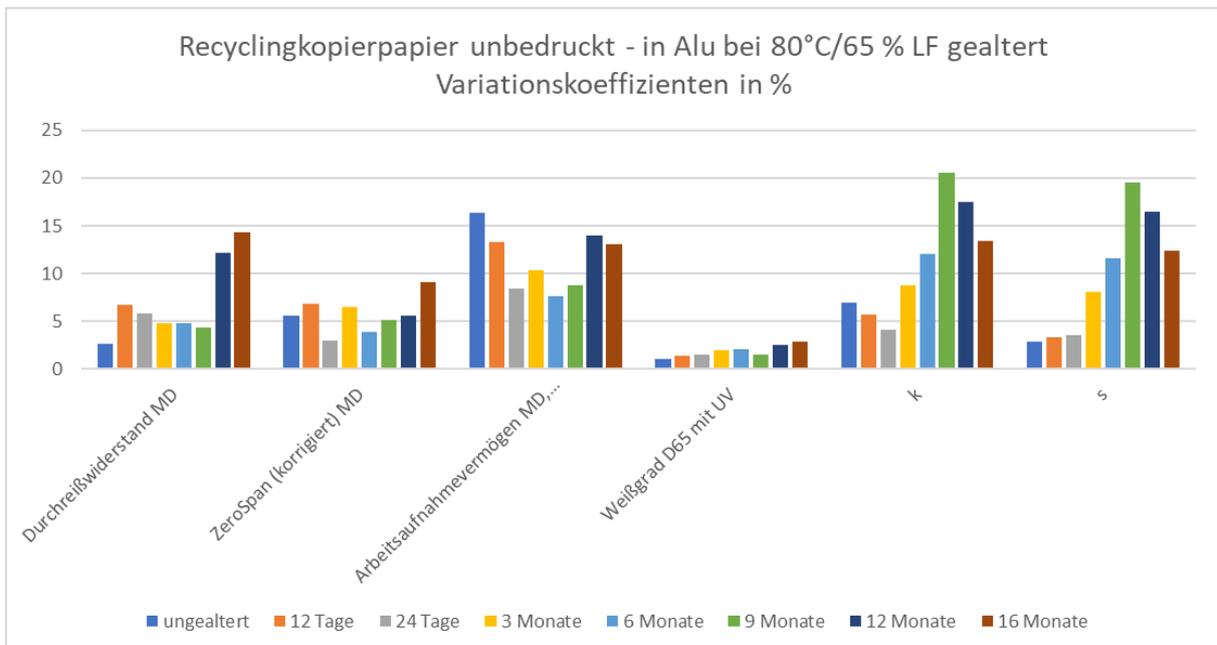


Abbildung 81 Recyclingpapier – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung

Dies kann damit erklärt werden, dass das Recyclingpapier nicht nur aus ligninhaltigen Fasern besteht, sondern auch Zellstoffasern aus dem Altpapier enthält. Zusammen mit dem Füllstoffgehalt an Calciumcarbonat, der mit 20 % höher ist als die der Laborblätter um 3 %, ist das Recyclingpapier weniger alterungsanfällig hinsichtlich seiner optischen Eigenschaften als ein zu 100 % aus ligninhaltigen Fasern bestehendes Papier.

Abbildung 82 zeigt den direkten Vergleich zwischen Standardabweichung und Variationskoeffizient beim Recyclingkopierpapier für den Durchreißwiderstand in Längsrichtung.

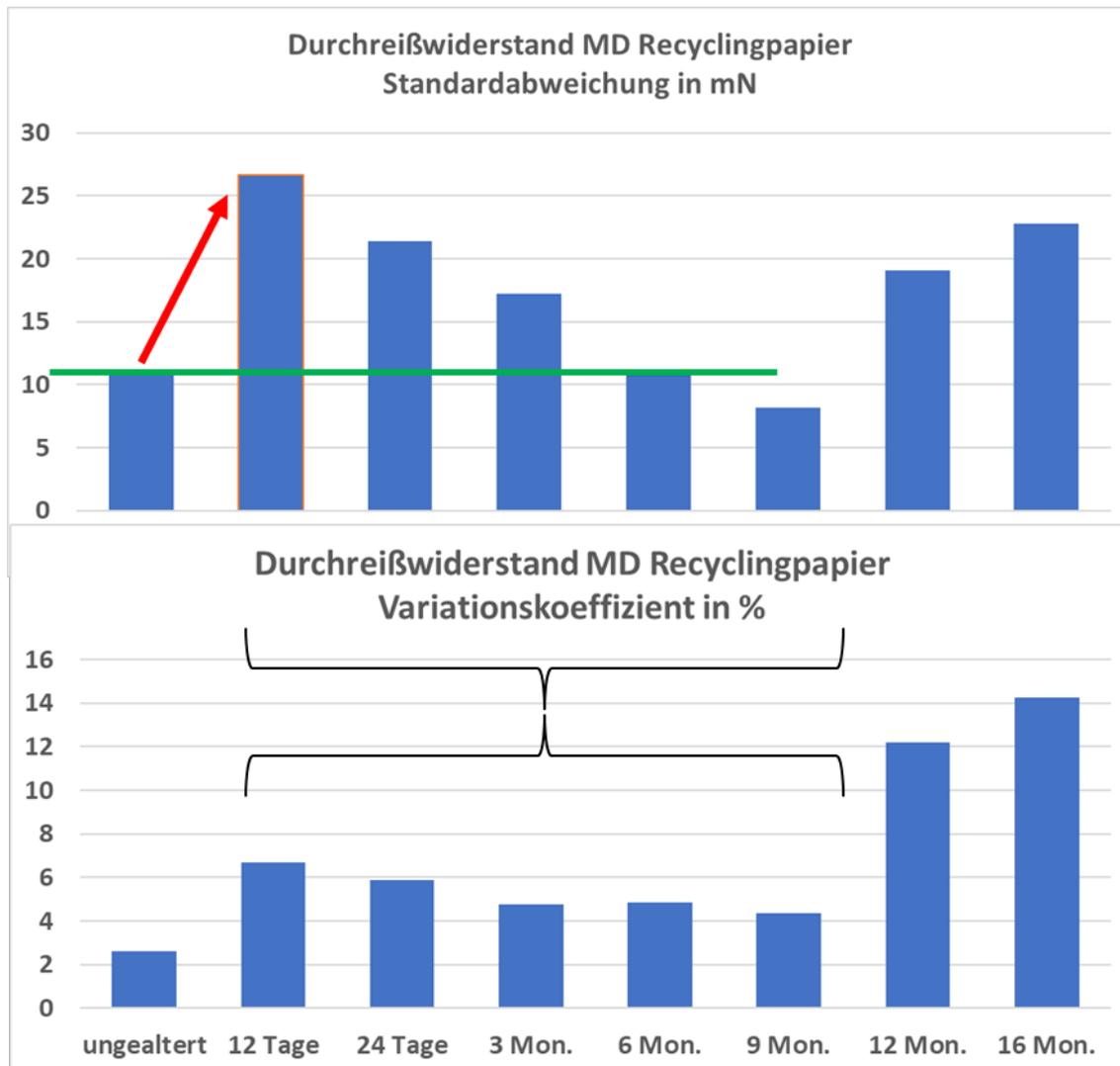


Abbildung 82 Recyclingkopierpapier - Vergleich Standardabweichung/Variationskoeffizient

Am Anfang springt die Schwankung stark, was durch den Alterungsprozess initiiert sein kann. Dann sinkt die Standardabweichung bis zum Monat 6 wieder auf den Ausgangswert, d.h. das Papier scheint sich vergleichmäßig zu haben. Aber der Variationskoeffizient zeigt, dass die prozentuale Schwankung wenig sinkt. D. h. bezogen auf den sinkenden Mittelwert zeigt das Papier prozentual immer ähnliche Schwankung. Erst gegen Ende steigt die Schwankung stark

an und deutet an, dass hier noch unbekannte Vorgänge ausgelöst worden sein könnten, z. B. biologischer Abbau durch Pilzbefall, was aber an dieser Stelle nur Spekulation sein kann.

Weitere Datenanalysen wären möglich, sind aber in der Leistungsbeschreibung nicht ausdrücklich verlangt und durch das Budget des Projektes nicht mehr abgedeckt. Steigende Schwankung zeigt steigende Inhomogenität an und deutet somit auf eine Schwächung des Papiers. Im Mittel hält ein Papier noch einen guten Wert, lokal kann es aber schon zu Unterschreitungen im Papiergefüge kommen.

Generell bleibt darum für alle Papiere festzuhalten, dass die Messwertschwankungen bei der Angabe von Soll- oder Mindestwerten berücksichtigt werden müssen. Oft wird als Mindestwert für ein Papier vor der Alterung z. B. beim Durchweißwiderstand ein Wert von 350 mN verlangt (ISO 9706, ISO 20494 und weitere). Zu empfehlen ist der Zusatz, dass ein am ungealterten Papier gemessener Einzelwert mit 99 %iger Wahrscheinlichkeit über dem Mindestwert bzw. Sollwert liegen muss. Das ist dann der Fall, wenn der Mittelwert mindestens 2,326-mal der Standardabweichung über dem verlangten Wert liegt.

4.4.6 Begründete Empfehlungen hinsichtlich Auswahl und Entwicklung eines bezüglich Langzeitbeständigkeit am besten abgestimmten Systems „Papier – Schreib-/Druckstoff“

Laut Leistungsbeschreibung soll eine Empfehlung für ein System Papier- Schreib-/Druckstoff abgegeben werden, welches mindestens 500 Jahre überdauert, abgegeben werden. Naturgemäß muss aus den heute vorliegenden Daten in die Zukunft extrapoliert werden. Dies kann nur auf Grund von Annahmen geschehen, deren Richtigkeit die Zukunft erweisen muss.

Der Abschätzung einer Lebensdauer können die Angaben der DIN 6738 zu den Lebensdauerklassen und die Angabe der ISO 20494 zur Alterungsrate zugrunde gelegt werden. Nach DIN 6738 beschreibt die Lebensdauerklasse 12-80 ein Papier, welches mehrere hundert Jahre überdauert. Das Papier muss dazu eine Lebensdauerfaktor von 0,8 erreichen, der sich aus dem Messwert der betrachteten Eigenschaft zu Beginn und nach der Alterung errechnet und einen Mindestwert mit einbezieht (siehe (DIN 6738)).

In der folgenden Tabelle 34 ist dargestellt, welchen Lebensdauerfaktor die unbedruckten Industripapiere nach 3 Monaten aufweisen. Betrachtet wurde der Durchreißwiderstand, weil dieser von verschiedenen Normen referenziert wird (siehe Tabelle 1). An sich sagt DIN 6738 aus, dass nach 12 Tagen Alterung ein Faktor von mindestens 0,8 erreicht werden soll, um eine Lebensdauer von mehreren hundert Jahren annehmen zu können. Allerdings hat das Projekt „Labest Papier“ gezeigt, dass 12 Tage Alterung nicht immer ausreichend sind, um Senkungs-

raten bei den betrachteten Eigenschaften in Gang zu setzen. Darum wird hier der Ansatz gewählt zu prüfen, bis zu welcher Alterungszeit der Faktor $> 0,8$ noch erhalten bleibt. Bei fast allen Papieren ist dies die Alterungszeit 3 Monate.

Tabelle 34 Industripapiere unbedruckt – Lebensdauerfaktor nach 3 Monaten Alterung

Parameter „Durchreißwiderstand“	Lebensdauerfaktor nach 3 Monaten Alterung bei 80 °C/65 % LF; Soll $> 0,8$
Hadernpapier	0,99
Recyclingkopierpapier	0,85
ISO 9706-konformes Büropapier	0,72
Inkjetpapier (holzfrei, beschichtet)	0,83
Gestrichenes Papier, holzfrei	0,84
Gestrichenes Papier, holzhaltig	0,87
Ungestrichenes Papier, holzhaltig	0,88
Bibeldruckpapier	0,84

Auffällig ist das ISO 9706-konforme Büropapier. Dieses erreicht als einziges Papier nach drei Monaten die geforderten 0,8 nicht mehr. Das Papier erreicht den Faktor noch nach 2 Monaten Alterung. Das beste Papier, das Hadernpapier, erreicht den Faktor immer noch nach 12 Monaten Alterung und erst nach 16 Monaten Alterung nicht mehr.

Alle Papiere würden die Bedingung der DIN 6738 für die Lebensdauerklasse LDK 12-80 erfüllen und wären somit mehrere hundert Jahre haltbar. Sieht man auf Grundlage der Messungen im Projekt „Labest Papier“ diese Evaluation kritisch, so bleibt zu bedenken, dass die Reifungsprozesse nach Sichtung der Daten nach 24 Tagen abgeschlossen sein müssten. Wenn danach eine weitere Alterung stattfindet, dann greift die Argumentation der DIN 6738 wieder. Dann wäre die Einhaltung des Faktors von 0,8 nach 2 Monaten (also 36 statt 12 Tagen zusätzlicher Alterung) weiterhin ein Indiz für die Einordnung in die LDK 12-80. Damit wären wiederum alle Papiere mehrere hundert Jahre lang haltbar.

Eine weitere Möglichkeit der Abschätzung der Lebensdauer von Papieren ist die Argumentationskette der ISO 20494. Dort wird angegeben, dass eine beschleunigte Alterung über 12 Tage bei 80 °C/65 % Luftfeuchte einer natürlichen Alterung von 35 Jahren entspricht (siehe (ISO 20494)).

Dieser Argumentation zufolge entspräche die beschleunigte Alterung über 6 Monate einer natürlichen Alterung von 520 Jahren. Da alle Papiere dann noch eine Restfestigkeit beim Durchreißwiderstand von über 50 % haben und den Mindestwert von 50 mN an Festigkeit nach DIN 6738 erfüllen, können auch nach dieser Argumentation alle hier betrachteten Industripapiere für mindestens 500 Jahre haltbar angesehen werden.

Des Weiteren kann die Aussage der DIN 6738, Festigkeitswerte weisen bei Alterung einen asymptotischen Verlauf auf, für eine überschlägige Berechnung der Haltbarkeitsdauer heran-

gezogen werden. Analog zu vielen natürlichen Prozessen, die entlang einer e-Funktion verlaufen, kann der beschriebene asymptotische Verlauf durch eine Funktion der Form $a \cdot e^{-bt}$ beschrieben werden. In diesem Fall wäre a der Wert der betrachteten Eigenschaft zu Beginn der Alterung (Zeitpunkt 0). Die Alterungsrate b lässt sich über den gemessenen Restwert der Eigenschaft zu einem späteren Zeitpunkt errechnen. Mit unendlich langer Dauer der Alterung würden der betrachtete Festigkeitswert gegen Null streben, d. h. man nimmt an, das Papier zerfiele am Ende.

Aus den vielen Messungen im Rahmen des Projektes Labest Papier könnte b mehrfach bestimmt und ein Mittelwert errechnet werden. Die Messungen zu Anfang der Alterung sind aber noch stark durch Schwankungen bestimmt, die deswegen keine robuste Berechnung von b zulassen. Darum wurde b mit Hilfe der nach 16 Monaten gemessenen Werte bestimmt. Die Zahlen sind sehr klein. Um ihre Bedeutung zu veranschaulichen, wird in der folgenden Tabelle 35 dargestellt, nach theoretisch wie vielen Jahren künstlicher und natürlicher Alterung der Durchreißwiderstand den Mindestwert 50 mN einnimmt, den die DIN 6738 als den Wert angibt, bei dem ein Papier noch problemlos saniert (z. B. durch Massenentsäuerung) werden kann.

Die Tabelle liest sich so: Hadernpapier (Spalte 1) hat einen Startwert beim Durchreißwiderstand von 902 mN (Spalte 2). Nach theoretisch 17 Jahren Alterung im Klimaschrank bei 80 °C und 65 % Luftfeuchte ist dieser Wert auf 50 mN abgesunken (Spalte 3). Mit der Angabe nach ISO 20494, dass 12 Tage Alterung bei 80 °C einer natürlichen Alterung von 35 Jahren entsprechen, würde das Hadernpapier den Wert von 50 mN bei natürlicher Alterung erst nach 18.040 Jahren erreichen (Spalte 4). Nach DIN 6738 ist der geforderte Mindestwert von 50 mN nach der Alterung der Wert, den das Papier haben muss, um noch die Prozedur einer Sanierung (z. B. einer Massenentsäuerung) durchlaufen zu können.

902 mN als Startwert sind sehr hoch. Hätte das Hadernpapier als Startwert nur den von verschiedenen Normen geforderten Mindestwert von 350 mN (siehe ISO 9706, ISO 11108, UNI 10332 und ISO 20494), dann wäre es nach 12.135 Jahren sanierungsbedürftig (letzte Spalte). So kann man vor allem die Alterungsdauer des Bibeldruckpapiers beurteilen, dass wegen seiner geringen flächenbezogenen Masse und seines hohen Aschegehaltes zu Beginn nur 139 mN als Startwert aufweist. Trimmt man dieses Papier (z. B., indem man es schwerer macht) auf 350 mN, dann hält es deutlich länger und verdoppelt die Dauer, bis es zum Sanierungsfall wird.

Tabelle 35 Theoretische Papierhaltbarkeit bis zum Sanierungsbedarf

	Start in mN	Theoretische Dauer bis 50 mN, künstlich gealtert, 80 °C	Theoretische Dauer bis 50 mN bei natürlicher Alterung mit Startwert	Theoretische Dauer bis 50 mN bei natürlicher Alterung mit Start 350 mN
Hadernpapier	902	17 Jahre	18.040 Jahre	12.135 Jahre
Recycl. Büro ISO 9706	417	2,9 Jahre	3.098 Jahre	2.843 Jahre
Büro	492	5,7 Jahre	6.023 Jahre	5.124 Jahre
Inkjet-Papier hf' gestrichen	604	3,4 Jahre	3.612 Jahre	2.821 Jahre
hh' gestrichen	723	5,5 Jahre	5.876 Jahre	4.280 Jahre
hh' natur	398	5,2 Jahre	5.482 Jahre	5.141 Jahre
Bibeldruck	483	4 Jahre	4.256 Jahre	3.653 Jahre
	139	4 Jahre	4.209 Jahre	7.996 Jahre

Die mit dem Durchreißwiderstand angestellten Berechnungen können auch mit der Bruchkraft durchgeführt werden. Dabei ergeben sich deutlich höhere Zeiten bis zum Abfall auf den Mindestwert. Im Sinne einer vorsichtigen Abschätzung ist die Bewertung nach dem Durchreißwiderstand daher der Bewertung nach der Bruchkraft vorzuziehen.

Die in Tabelle 35 aufgeführten Erwartungswerte dürfen nur als Richtlinie gelten. Die Regel der ISO 20494, dass 12 Tage künstliche Alterung 35 Jahren natürlicher Alterung entspricht, sind nicht allgemein akzeptiert und werden vor allem in den Normungsgremien zur Archivierung (so die Arbeitsgruppe ISO/TC46/SC10/WG7 auf ISO-Ebene und der Normenausschuss NA 009-00-14 AA auf DIN-Ebene) als nicht hinreichend nachgewiesen und in die Irre führend abgelehnt (Committee Manager ISO/TC6/SC2 17.03.2023).

Um dieser berechtigten Kritik Rechnung zu tragen, andererseits trotzdem eine Aussage treffen zu können, ob die Papiere – wie in der Leitungsbeschreibung gefordert – 500 Jahre überdauern, sei noch ein weiterer Ansatz betrachtet.

Hierzu wird unterstellt, die Papiere würden in genau 500 Jahren natürlicher Alterung den Mindestwert von 50 mN im Durchreißwiderstand erreichen, den die DIN 6738 zur Erhaltung der Sanierbarkeit vorgibt. D. h. bei allen Papiern wird angenommen, dass sie genau 500 Jahre haltbar sind. Gleichzeitig kann man aus den Messungen, die für das Projekt „Labest Papier“ durchgeführt wurden, berechnen, wann dieser Mindestwert bei beschleunigter Alterung (80 °C/65% Luftfeuchte) erreicht wird. Setzte man diesen Wert zu den 500 Jahren unterstellter Haltbarkeit in Beziehung, so berechnet sich ein theoretischer Umrechnungsfaktor, die das Papier haben müsste, damit es „nur“ die unterstellten 500 Jahre hält. Die berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36 Theoretischer Umrechnungsfaktor beschleunigt/natürlich gealtert bei unterstellten 500 Jahren Alterungsbeständigkeit

	Umrechnungsfaktor“ 12 Tage künstl. Alterung = x Jahre natürliche Alterung
Angabe ISO 20494	35 Jahre
Hadernpapier	1 Jahr
Recycling Büropapier	5,6 Jahre
ISO 9706 Büropapier	2,9 Jahre
Inkjet-Papier	4,8 Jahre
hf' gestrichen	3,0 Jahre
hh' gestrichen	3,2 Jahre
hh' natur	4,1 Jahre
Bibeldruck	4,2 Jahre

Je kleiner der Umrechnungsfaktor, desto schneller müsste das Papier auf natürliche Weise altern, um nach 500 Jahren schon auf den Mindestwert des Durchreißwiderstandes abgefallen zu sein. Alle Papiere müssten demgemäß deutlich schneller altern als von der ISO 20494 angegeben.

Betrachtet man die ligninhaltigen Papiere (Recyclingkopierpapier, hh' gestrichen und hh' natur), so entspräche nach dieser Rechnung eine Alterung von 12 Tagen im Klimaschrank bei 80 °C/65 % LF einer natürlichen Alterung zwischen 3,2 und 5,6 Jahren.

Das Beispiel des über 20 Jahre alten Signa Set-Papiers aus Recyclingfasern zeigt jedoch, dass nach dieser Zeit noch keine signifikante Alterung festgestellt werden konnte. Die holzhaltigen Papiere müssen deutlich mehr als 3,2 bzw. 5,6 Jahre natürlich altern, um die Werte der beschleunigten Alterung zu erreichen. Damit überdauern sie auf alle Fälle die geforderte Mindestdauer von 500 Jahren und fallen erst später auf den Mindestwert der Durchreißfestigkeit ab.

Die Ausführungen in den obigen Kapiteln weisen einheitlich darauf hin, dass es bezüglich der Papiere eine klare Reihenfolge der Alterungsanfälligkeit der Fasern gibt. Wie schon der Literatur zu entnehmen, sind Fasern aus reiner Cellulose (Linters, Hadern) am wenigsten alterungsanfällig, sowohl hinsichtlich der mechanischen, der chemischen als auch der optischen Eigenschaften. Hinzu kommt die im Rahmen des Projekts „Labest Papier“ aufgedeckte Eigenschaft, dass auch eine morphologische Änderung der Fasern durch künstliche Alterung gemessen werden kann, die wiederum bei reinen Cellulosefasern am geringsten ausfällt.

Gebleichter Zellstoff, bei dem die Fasern aus Cellulose und Hemicellulose, aber ohne Lignin, bestehen, folgt der reinen Cellulose dicht auf. Die Unterschiede zwischen beiden Fasertypen sind messbar und signifikant. Die jeweiligen Änderungen der Eigenschaften ähneln sich jedoch sehr.

Deutlich fallen dagegen ligninhaltige Fasern ab. Sie altern chemisch, optisch und mechanisch am schnellsten und am stärksten. Der Einfluss des Lignins ist so groß, dass es ligninfreie Fasern in der Alterung negativ beeinflusst, wenn es mit ihnen zusammen gelagert wird (siehe Abbildung 16 und Abbildung 24).

Wie die Messungen an den Industrierpapieren zeigen, kann der Einfluss der Alterungsmechanismen durch Calciumcarbonat gebremst und im optischen Bereich ausgeglichen werden. Calcium bietet eine Alkalireserve und puffert so die durch Alterung entstehende sauren Abbaustoffe ab. Chemisch reicht die von der Norm vorgeschriebene Alkalireserve bei Linters und gebleichten Zellstofffasern aus. Bei ligninhaltigen Fasern ist ein höherer Calciumcarbonatanteil empfehlenswert, da hier mehr Abbauprodukte entstehen. Physikalisch bietet Calciumcarbonat Vorteile bei der optischen Alterung. Da es selbst nicht altert, stabilisiert es in hohen Konzentrationen (20 % Masseanteil oder mehr) die optischen Eigenschaften.

Der Füllstoff trägt selbst nicht zur Festigkeit des Papiers bei, kann aber durch seine puffernde Wirkung dafür sorgen, dass ein Ausgangsniveau an Festigkeit langsamer abgebaut wird. Stellt man durch die Rezeptur bei der Papierherstellung sicher, dass eine ausreichende Festigkeit erzielt wird, kann die stabilisierende Funktion des Calciumcarbonats genutzt werden.

Ebenfalls als sehr positiv hat sich der Füllstoff Titandioxid erwiesen. Am Bibelpapier im Vergleich zum Hadernpapier konnte gezeigt werden, dass er schon in Konzentrationen um 7 % Masseanteil die optischen Eigenschaften sehr gut stabilisieren kann. Dies liegt an der kleinen Korngrößenverteilung dieses speziellen Pigments, wodurch es im Papier eine hohe Wirkung entfaltet. Allerdings ist es teuer, seine Herstellung ist nicht umweltfreundlich und der Umgang damit, solange nicht in einer Slurry (wässrige Dispersion) oder im Papier gebunden, ist arbeitssicherheitstechnisch nicht unproblematisch. Diese Aspekte sollten bei der Auswahl mit einbezogen werden.

Kaolin als dritter typische Füllstoff oder Streichfarbenkomponente stabilisiert optisch ähnlich gut wie Calciumcarbonat, hat aber nicht dessen puffernde Wirkung. Kaolin stört nicht, ist aber nicht extra empfehlenswert.

Zudem hat sich am Bibelpapier noch gezeigt, dass hoch ausgemahlene Fasern, mit denen ein hohes Festigkeitsniveau erreicht wird, diese Fähigkeit lange behalten können. Hier erweist sich der gebleichte Zellstoff des Bibelpapiers als dem weniger stark gemahlene Faserstoff des Hadernpapiers überlegen.

All die eben genannten Argumente ermöglichen es, eine Papier-/Füllstoffkombination für den gemäß den Ergebnissen des Projektes „Labest Papier“ best-möglichen Fall benennen. Zunächst seien aber noch die Fakten zu den Druckverfahren und Schreibstoffen berücksichtigt.

Vor allem Tabelle 7 zeigt, dass die Druckverfahren die Papiere mechanisch beeinflussen. Der Tiefdruck erweist sich hier als das Verfahren mit dem geringsten Einfluss auf das Papier. Aus Tabelle 21 und Tabelle 22 geht hervor, dass beim Tiefdruckverfahren nach der Alterung die Farben und der Kontrast gut erhalten bleiben. Insofern ragt der Tiefdruck qualitätsmäßig gegenüber anderen Verfahren heraus, was nicht überrascht, da er in der Fachwelt als „bestes“ Druckverfahren bekannt und geschätzt ist.

Die anderen Druckverfahren und Schreibstoffe sind deswegen nicht ungeeignet. Die Beachtung der Lichtechtheit, Ausblutfreiheit und Abriebfestigkeit, wie sie in (DONot 2020) und (DIN ISO 11798) festgelegt sind, lassen bezüglich des Schreibstoffs keine Probleme hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit erwarten. Auch bezüglich des Druckverfahrens lässt sich somit ein best-möglicher Fall erkennen.

Stifte wie Kugelschreiber, Fineliner, Füller etc. und Stempelfarben sind durch die jeweils gültigen Normen (DIN ISO 12757-2), (DIN ISO 14145-2) und (ISO 27668-2) ausreichend beschrieben, so dass bei Beachtung keine Probleme hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit zu erwarten sind.

Empfehlung hochwertiger Papiere

Gemäß den gesammelten Informationen wäre ein Papier aus hoch ausgemahlene Lintersfasern (Hadern) mit ca. 20 % Calciumcarbonat und ca. 7 % Titandioxid und einer flächenbezogenen Masse, die eine Anwendung als Büropapier gemäß DIN EN 12281 ermöglicht, die beste Wahl. Der Gehalt an Füllstoffen ist dabei nicht als festgelegt zu sehen, geringere Anteile könnten die hier gemessenen Vorteile immer noch bieten.

Ein derartiges Papier wäre ähnlich dem, was für Geldscheine eingesetzt wird. Es müsste explizit entwickelt werden. Auf die bei Geldscheinen nötige hohe Nassfestigkeit kann verzichtet werden, natürlich auch auf die Sicherheitsmerkmale. Eine Anpassung für die Nutzung als graphisches Dokumentationspapier wäre nötig, aber nicht abwegig. Geldscheine werden üblicherweise im Tiefdruckverfahren bedruckt, das Papier würde also a priori schon mit dem hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften besten Druckverfahren harmonieren. Die Eignung für das hinsichtlich der chemischen Eigenschaften beste Druckverfahren, den Druck mit Trockentoner, würde durch eine Entwicklung zum Dokumentationspapier sichergestellt.

Ein derartiges Papier wäre teuer und wegen der Knappheit des Rohstoffs „Linters“ nicht als Massenbüropapier verfügbar. Es wäre jedoch überlegenswert, besondere Informationen auf

diesem Papier im Tiefdruckverfahren zu dokumentieren. Dies wäre dann angebracht, wenn der Originalzustand so lange wie möglich erhalten bleiben soll bzw. wenn nach einer Alterung der Zustand so dicht wie möglich am Original bleiben soll. Wenn Bedenken wegen der flüchtigen Anteile bestehen, die beim Tiefdruck nicht ausbleiben, kann mit Trockentoner gearbeitet werden. Dieser Druck wäre nicht so hochwertig, die durch ihn hervorgerufenen mechanischen Beeinträchtigungen des Papiers sind nicht von hoher Relevanz.

Diesem Papier gleichwertig wäre eine ähnliche Zusammensetzung, nur dass statt Linters gebleichter Zellstoff als Faserstoff zum Einsatz käme. Es wäre eine aus dem Bibeldruckpapier entwickelte Variante, bei der die flächenbezogene Masse erhöht werden müsste und das Papier so zu den nach DIN EN 12281 nötigen Eigenschaften eines Büropapiers gelangen würde. Nominell nach den Ergebnissen des Projektes „Labest Papier“ und den in Tabelle 35 dargestellten Haltbarkeiten wäre diese Variante schlechter als die aus Linters, in beiden Fällen würde es sich aber um Premiumpapiere handeln, die im Tiefdruck ein hervorragendes Druckergebnis versprechen, welches sehr lange Zeit haltbar ist und sich nur langsam, dennoch messbar, verändert. Auch der Druck mit Trockentoner ist möglich. Die eben beim Linterspapier gemachten Anmerkungen gelten auch hier. Die Einhaltung der in der Leistungsbeschreibung geforderten 500 Jahre Mindesthaltbarkeit darf als erfüllt angenommen werden.

Empfehlung gut geeigneter Papiere

Spezialpapier und Tiefdruck mögen den besten Fall darstellen und ihre Berechtigung haben. Der tägliche Büroalltag sieht anders aus! Selbst für anspruchsvolle Informationen reicht ein ISO 9706-konformes Büropapier aus. Farben und Schriften bleiben erhalten. Das fehlende Titandioxid und der üblicherweise eingesetzte optische Aufheller führen mit der Zeit zu deutlichen optischen Veränderungen, derer man sich bewusst sein muss, die man aber in Kauf nehmen kann, wenn eine möglichst geringe Distanz zum Ursprungszustand nicht verpflichtend ist. Das Bedrucken mit dem hinsichtlich geringer Mengen an flüchtigen Substanzen beten Druckverfahren, dem Druck mit Trockentoner, ist bei diesem Papier Standard und liefert gute Druckergebnisse. Für den Tiefdruck wäre das Papier nicht geeignet.

Ein ISO 9706-konformes Büropapier erfüllt alle Anforderungen, die im Büroalltag an solch ein Papier gestellt werden, was durch die Einhaltung der DIN EN 12281 gewährleistet ist. Es sind durch Kopierer, Laser- oder Inkjetdrucker schnelle Erstellung und Vervielfältigung von Dokumenten möglich. Der bislang gewohnte Büroablauf müsste nicht umgestellt werden, was bei der Nutzung der Premiumvarianten und Tiefdruck der Fall wäre.

Das Papier mit den auf ihm gespeicherten Informationen wird nach jetzigen Erkenntnissen auch in 500 Jahren noch nutzbar und lesbar sein (sofern auf die einschlägigen Anforderungen

an die Druckfarben Rücksicht genommen wird). Die Qualität dieses Papiers wird jedoch abnehmen. In 500 Jahren wird voraussichtlich der Qualitätsunterschied zu den Premiumvarianten höher sein als zu Beginn eines solchen Zeitraums. Dies liegt nicht nur am Papier, sondern auch an den das Papier beanspruchenden Druckverfahren. Ein Bedrucken im Tiefdruck macht aber keinen Sinn, hierzu müsste das Papier ebenfalls weiterentwickelt werden und verlöre dadurch seinen Pluspunkt der allgemeinen Bürotauglichkeit und der breiten Anwendung in Wirtschaft und Gesellschaft.

Empfehlung ausreichend gut geeigneter Papiere

Qualitätsmäßig hinter den eben genannten Papieren rangiert das Recyclingkopierpapier. Gemäß Tabelle 5 weist es bei der durchgeführten künstlichen Alterung die größten Einbußen auf. Vor allem ist es nicht in der Lage, die Doppelfalzzahl im messbaren Bereich zu halten. Auch optisch und fasermorphologisch durchwandert es die größten Änderungen der untersuchten Industripapiere. Entsprechend Tabelle 35 belegt es zusammen mit dem holzfreien Inkjetpapier den letzten Platz in der Haltbarkeitserwartung. Mit erwarteten ca. 2.800 Jahren Dauer bis zur Sanierungsbedürftigkeit erfüllen beide Papiere aber den Anspruch an die Haltbarkeit von über 500 Jahren. Dieses Ergebnis unterstreicht nachträglich die Richtigkeit des Sondervotums des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aus dem Jahre 1992 (Bund-Länder-Arbeitsgruppe Papierzerfall 1992), in dem die Verwendung von Recyclingpapier trotz Ablehnung der Kommission befürwortet wurde.

Dennoch ist zu berücksichtigen, dass die Alterungsbedingungen sehr scharf sind und möglicherweise zu Abbauprozessen führen, die bei normalen oder gar günstigen Lagerbedingungen nicht eintreten würden. Einen deutlichen Hinweis hierauf gibt das über mehr als 20 Jahre natürlich gealterte Papier Signa Set rot, welches trotz ungünstiger Lagerbedingungen immer noch die Sollkriterien zur Zeit seiner Herstellung erfüllt!

Hieraus ist zu schließen, dass die gewählten beschleunigten Alterungsmethoden zwar in der Lage sind, die Papiere nach ihrer Qualität zu differenzieren. Sie prognostizieren aber nicht den Zustand eines holzhaltigen oder Recyclingpapiers in 500 Jahren.

Vielmehr war im Laufe des Projektes „Labest Papier“ mehrfach festzustellen, dass eine gewisse natürliche oder auch künstliche Alterung zunächst zu einem Anstieg von Festigkeiten, ähnlich einem Reifungsprozess, führen kann. Lediglich die optische Alterung beginnt sofort.

Calciumcarbonat als Puffer kann auch hier saure Abbauprodukte binden und der natürlichen Alterung Einhalt gebieten. Das Recyclingkopierpapier ist zudem als Büropapier bewährt und hat seine Alltagstauglichkeit längst unter Beweis gestellt.

Daher steht zu erwarten, dass auch ein in Neutralfahrweise hergestelltes, calciumcarbonathaltiges (ca. 20 %) Papier in 500 Jahren noch sehr gut nutzbar und lesbar ist. Die Qualitätsunterschiede gegenüber einem ISO 9706-konformen Büropapier werden messbar und sichtbar sein. Aber das Papier wird in der Lage sein, die auf ihm gedruckten und geschriebenen Informationen zu übermitteln. Mit Farbverschiebungen und Festigkeitsverlusten ist zu rechnen, aber das Papier wird seinen Zweck gut genug erfüllen. Die anderen betrachteten graphischen Papiere, ob gestrichen oder ungestrichen, holzhaltig oder holzfrei, reihen sich in die eben gemachten Empfehlungen ein.

Ablehnungsempfehlungen

Per se muss ein Papier nur dann zwingend abgewiesen und als untauglich für Dokumentation verworfen werden, wenn es nicht in Neutralfahrweise hergestellt wurde, im pH-Wert des Kaltwasserextraktes kleiner als 7,5 liegt oder Zusatzstoffe enthält, die stark sauer reagieren (z. B. Aluminiumsulfat, Eisen-III-Chlorid oder ähnliches).

Des Weiteren muss ein Papier abgewiesen werden, welches nicht die Mindestfestigkeit nach ISO 9706 von 350 mN bei Durchreißwiderstand (in MD und CD-Richtung) einhält. Dies soll dadurch erreicht werden, dass 99 % der Messwerte eines Papiers über diesem Sollwert liegen, d.h. Mittelwert minus 2,326 mal der Standardabweichung darf die 350 mN nicht unterschreiten. Zudem muss dieses Papier nach einer Alterung bei 80 °C und 65 % Luftfeuchte über einen definierten Zeitraum noch mindestens 80 % seines Anfangswertes erreichen. Für den definierten Zeitraum werden über die ISO 20494 hinaus 2 Monate beschleunigte Alterung vorgeschlagen, um eventuelle Reifungsprozesse abgedeckt zu haben. Ebenfalls untauglich sind Papiere mit reaktiven Beschichtungen, etwa Selbstdurchschreibepapiere, thermoreaktive Papiere, fotosensitive Papiere oder ähnliches.

Zu unterscheiden wäre jedoch, ob etwa ein Thermodruckpapier eine chemisch reaktive Schicht hat, die bei Wärme zu Reaktionen angeregt wird, dann wäre dies abzulehnen. Wird jedoch durch z. B. Hitze eine Schicht entfernt und dadurch die Information freigelegt (also keine chemische Reaktion zur Farbgebung ausgelöst), so muss dieses Papier nur dann abgelehnt werden, wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass es mit ähnlicher Hitze wie beim Druckprozess in Berührung kommt.

Ansonsten haben sich vor allem die Befürchtungen hinsichtlich der gestrichenen Papiere nicht bewahrheitet. Ein kritisches Hinterfragen, ob verwendete Bindemittel elastisch genug sind und nicht zur Versprödung neigen, ist sinnvoll. Die gestrichenen Papiere zeigen sogar Vorteile, was die optische Alterung angeht. Für eine Langzeitdokumentation sind sie nicht zu bevorzugen, sie müssen aber auch nicht abgelehnt werden.

5 Bewertende Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt „Labest Papier– Langzeitbeständigkeit von Papier“ soll für das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) die Eignung von Papier, über mindestens 500 Jahre als dauerhaft unversehrter Informationsträger zu dienen, beurteilt werden.

Arbeitspaket 1: Stand des Wissens und Normungslage

Im Arbeitspaket 1 wird mit einer Literaturrecherche ein Überblick über den Stand des Wissens, die Normungslage und übliche Testmethoden gegeben. Allgemein kann konstatiert werden, dass die Auffassung zu den Alterungsmechanismen bei Papierfaserstoffen und die Beiträge einzelner Komponenten hierzu sich seit Erkennen des Problems Ende des 19. Jahrhunderts nur wenig geändert haben. Der Festigkeitsverlust des Papiers in den Archiven ist durch Degradation des natürlichen Polymers Cellulose in Verbindung mit seinen Begleitern Hemicellulose und Lignin begründet. Vornehmlich Säuren begünstigen einen hydrolytischen Abbau, hinzu kommen Oxidationsreaktionen, die im Cellulosemolekül Veränderungen bewirken, welche einer weiteren Degradation Vorschub leisten. Abbauprodukte dieser Alterungsreaktionen führen zu Oxidanzien oder Säuren, welche diese Reaktionen durch Autooxidation beschleunigen. Ionen der Schwer- bzw. Übergangsmetalle (vornehmlich Eisen, Kupfer und Mangan) katalysieren diese Reaktion. Der Wassergehalt im Papier spielt eine große Rolle, da die Präsenz von Wasser für viele dieser Reaktionen notwendig ist. Ein zu geringer Wasseranteil im Papier führt aber zur Versprödung und das Papier ist nicht mehr nutzbar. Höhere Temperaturen führen naturgemäß ebenso zu einem schnelleren Ablauf der chemischen Reaktionen.

Vor allem Klimaschwankungen mit Feuchtesorptionsvorgängen begünstigen die Alterung, da nicht nur aus chemischen, sondern auch aus physikalischen Gründen Festigkeitsverluste im Papier eintreten. Hinzu kann Schimmelbefall kommen, wenn Zustände von 60 % relativer Luftfeuchte oder mehr länger anhalten. Auch Schädlingsbefall ist bei mangelhaft überwachter Lagerung nicht unbekannt.

Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts liest man die Empfehlung, alterungsbeständiges Papier sollte möglichst aus Hadern bestehen und nur wenige andere Beimengungen haben. Moderner formuliert heißt dies, dass der Gehalt an Cellulose möglichst hoch sein sollte und Hemicellulosen tolerierbar sind. Bei der Bewertung von Lignin gibt es neuere Meinungen. Galt Lignin generell bislang bei den meisten Fachleuten als Beiträger zur chemischen Alterung infolge seiner natürlichen Abbauprodukte, werden ihm mittlerweile von einigen Autoren antioxidative Wirkungen und damit alterungshemmende Eigenschaften zugeschrieben. Auch eine gewisse biozide Wirkung gegen Bakterien und Pilze ist anzunehmen. Dennoch fällt Lignin bei

der Alterung von Papier wegen seiner starken Vergilbungsneigung besonders auf. Insbesondere deswegen ist der von Normen und Vorschriften tolerierte Ligninanteil in Langzeitpapieren auf 1 % oder weniger begrenzt.

Strahlung, insbesondere UV-Strahlung, und Luftverschmutzung, insbesondere durch SO₂ und NO_x, sind weitere Kontributoren zur Alterung. Strahlung wirkt sich dabei weniger auf die Degradation der Cellulose aus, sondern zeigt sich vor allem in der Vergilbung.

Vielen der genannten Aspekte kann nur durch eine sachgemäße Lagerung im Dunkeln, bei definierten Klimaverhältnissen und sauberer Umluft Rechnung getragen werden. Hinzu kommt, dass Räume, Aufbewahrungsmittel und beigelagerte Produkte (z.B. Klarsichthüllen) beachtet werden müssen, wenn der natürliche Alterungsprozess so langsam wie möglich ablaufen soll. Raummanagement (mit Schädlingsmonitoring) und Dokumentenmanagement (mit Metadaten und Redundanzen) sind ebenfalls zu beachten.

Bei den Normen zur Beurteilung der Langlebigkeit von Papier sind zwei Ansätze festzustellen. Die ISO 9706 ist Hauptvertreter der Richtung, dass allein über die Zusammensetzung des Papiers und die Ausgangslage zu Beginn der Alterung eine Langlebigkeit sichergestellt werden kann. Die DIN 6738 verfolgt hingegen als Grundlage den Ansatz, die physikalische Alterung des Papiers anhand künstlicher Alterung und der dabei zu beobachtenden Festigkeitsverluste zu beurteilen. Andere Normen variieren die Ansätze etwas oder mischen sie teilweise, wozu sich eine Vergleichstabelle im Text findet.

Naturgemäß stellt sich damit die Frage, ob die Alterung von Papier über künstlich erzeugte Randbedingungen beschleunigt werden kann und damit Aussagen für den zukünftigen Zustand heutiger Papiere möglich sind. Dies ist bedingt zu bejahen. Generell laufen die Alterungsvorgänge bei höheren Temperaturen schneller ab, es können aber Begleitreaktionen initiiert werden, die bei niedrigen Temperaturen nicht ablaufen (ein drastisches Beispiel hierzu ist die Pyrolyse). Außerdem kann es bei Additiven, die sich im Papier befinden, zu Reifungsreaktionen kommen mit der Folge, dass die Festigkeit nach der künstlichen Alterung höher ist als vorher. Die Ergebnisse solcher Versuche müssen daher sorgfältig interpretiert werden. Die Auswahl der zu untersuchenden Parameter spielt hier eine wichtige Rolle. Zu empfehlen ist, neben physikalischen Festigkeits- und Zähigkeitswerten immer auch chemische Parameter mitzuprüfen. In diesem Zusammenhang ist es interessant zu wissen, dass ein Projekt in den USA läuft, bei dem Bibliotheken Papierbestände lagern, die über 100 Jahre lang alle 10 Jahre auf ihren Alterungszustand hin untersucht werden sollen.

Der Einfluss von Tinten und Druckfarben auf den Papierzerfall ist genauso spärlich untersucht wie die Alterung der Tinten selbst. Lediglich zu Kugelschreiberpasten gibt es belastbare Ergebnisse in der Literatur. Ersatzweise können die Ansätze aus der Textilindustrie zur Bestimmung der Lichtechtheit von Farben und deren Ausbluten herangezogen werden.

Dennoch ist Papier ein seit über 2000 Jahren bekannter Informationsträger, der seine Tauglichkeit zur Aufbewahrung von Langzeitinformation unter Beweis gestellt hat. Gegenüber modernen Informationsspeichern wie digitalen Medien oder Mikrofilm hat Papier zudem den Vorteil der langen Migrationszeit und dass kein Lese- oder Decodierungsgerät nötig ist.

Final bleibt zu sagen, dass es eine Unversehrtheit im Sinne einer „intangibilité“, also einer völligen Unberührtheit, bei Papier nicht geben kann. Papier ist ein Werkstoff, der aus natürlichen Polymeren besteht, die ihre Langlebigkeit im ältesten Baum der Welt, einer 9.500 Jahre alten Fichte in Schweden, unter Beweis stellen. Eine Langlebigkeit von Papier kann daher erwartet, aber nicht gewährleistet werden. Wie überhaupt jedes Material unterliegen die Inhaltsstoffe von Papier einer Alterung, die durch äußere Konditionen beschleunigt oder verzögert werden kann.

Arbeitspaket 2: Typische Schäden und ihre Handhabung

Mit dem Arbeitsstandbericht 2 wird ein Überblick über zu erwartende Schäden an Papierdokumenten, deren Vermeidung und übliche Methoden zum Umgang mit vermutlich bereits aufgetretenen Schäden gegeben.

Vielen der im AP1 genannten Aspekte, die einen Alterung begünstigen, kann nur durch eine sachgemäße Lagerung im Dunkeln, bei definierten Klimaverhältnissen und sauberer Umluft Rechnung getragen werden. Hinzu kommt, dass Räume, Aufbewahrungsmittel und beigelagerte Produkte (z. B. Metallteile wie Heft- oder Büroklammern) beachtet werden müssen, wenn der natürliche Alterungsprozess so langsam wie möglich ablaufen soll. Raummanagement (mit Schädlingsmonitoring und Reinigungsplänen) und Dokumentenmanagement (mit Metadaten und Redundanzen) sind ebenfalls zu beachten.

Konservierung, Restaurierung und Reparatur sind die drei Schlüsselbegriffe zum Umgang mit Schäden. Konservierung erschwert von vornherein die Alterung bzw. hält einen aktuellen Dokumentenzustand möglichst stabil, Restaurierung stellt unter Beachtung der Historie und der Bedeutung des Objektes den Zustand eines Dokumentes wieder her, Reparatur stellt nur die Gebrauchsfähigkeit wieder her. Alle drei Möglichkeiten sind bei der Bekämpfung von Schäden in Betracht zu ziehen, wobei eine Reparatur die angestrebte „Unversehrtheit“ des Dokumentes nicht berücksichtigt.

Mechanische Schäden, optische Schäden, chemische Schäden und biologische Schäden sind die Überbegriffe für die Schadensbilder, die man vorfindet. Darunter subsumieren sich wiederum Einzelschäden, die sich aus der Lagerung oder der Nutzung bzw. dem Transport ergeben haben. Dies impliziert, dass die Dokumente teilweise schon geschädigt eingelagert wurden (Beispiel: übervolle Ordner, dadurch Verwellungen, Knicke und Risse), eine „Unversehrtheit“ kann somit nur noch im archivarischen Kontext betrachtet werden. Dies meint, es geht um den Erhalt eines Originals in seinem ursprünglichen Zustand aus historischen Gründen, dann auch mit Knicken, Flecken oder Patina. Die Bedeutung des Erhalts zivil-nuklearer Dokumentation ist aber weniger historisch zu sehen, sondern zweckgebunden: Der Nachwelt sind dringend die Informationen zur atomaren Endlagerung nutzbar zu hinterlassen. Ein Umgang mit Schäden muss vor diesem Hintergrund mehr die Reparatur als die Restaurierung zum Ziel haben.

Dennoch kommt die Restaurierungserfahrung der Archivarinnen und Archivare, Papierrestauratorinnen und -restauratoren dem Projekt Labest Papier zunutze. Zum einen ist diese Berufsgruppe ständig mit der Fragestellung befasst, Dokumente für die Nachwelt zu erhalten, wobei es aber primär um den Erhalt des historischen Gegenstandes geht, nur sekundär um den Inhalt. Zum anderen liegen hier sehr lange Erfahrungen, auch über Irrwege erlangt, mit der Konservierung, Restaurierung und, wenn unumgänglich, Reparatur vor. Die Techniken zum Umgang mit Schäden an Papierdokumenten entspringen also im Wesentlichen aus dieser Quelle.

Die Gebrauchsfähigkeit eines Dokumentes hängt von zwei wesentlichen Faktoren ab. Zum einen muss die Restfestigkeit nach einem Alterungsprozess hoch genug sein, um das Dokument benutzen zu können. Zum anderen muss die darauf geschriebene Information noch lesbar bzw. erkennbar sein.

Die Nutzung eines Dokumentes erstreckt sich idealerweise auf den ursprünglichen Zweck, d.h. das Dokument kann im Zustand, in dem es ist, entnommen, gelesen, geblättert etc. werden. Sekundär kann es wichtig sein, das Dokument zumindest so beanspruchen zu können, dass eine Restaurierung, Reparatur oder Reproduktion möglich ist. Beeinträchtigt wird dies im Wesentlichen durch den säurekatalysierten Abbau der Cellulose und der daraus resultierenden mechanischen Versprödung. Entsäuerungsverfahren als konservierende Maßnahme sind für Papiere der Jahrgänge 1960 bis 1990 mit hoher Wahrscheinlichkeit unumgänglich.

Die Lesbarkeit der Information hängt von der Neigung des Papiers oder der Druckfarbe zum Vergilben bzw. Verblassen ab. Mit Vergilbung des Papierses muss generell gerechnet werden, sei es wegen des Einsatzes ligninhaltiger Fasern oder optischen Aufhellers. Aber die auf dem Papier gedruckte Information geht dadurch im Allgemeinen nicht verloren, d.h. der Kontrast bleibt ausreichend für die Lesbarkeit von schriftlicher Information. Druckfarbe und Spezialpa-

piere jedoch, insbesondere für wärmenutzende Druckverfahren (Thermodruck), alte Hektogra-
phien („Spiritusdrucker“) oder Blaupausen, verlieren über die Zeit an Kontrast und sind nicht
mehr lesbar. Eine rechtzeitige Reproduktion dieser Dokumente ist unumgänglich.

Die Grenzen der Möglichkeiten zum Umgang mit Schäden sind fast nur durch die vollständige
Zerstörung gesetzt. Ansonsten lassen sich, bei entsprechendem Zeit- und Geldaufwand, die
Informationen eines Dokumentes zumindest in Teilen wiederherstellen.

Die Kosten für die Maßnahmen zum Umgang mit Schäden sind individuell vom Zustand der
Dokumente und von der Zielsetzung beim Umgang mit den Schäden abhängig. Geht man
davon aus, dass die Dokumente des BASE noch keine offensichtliche Versprödung durchlau-
fen haben, dann kann als erster Anhaltspunkt ein Kostenrahmen von 2.000,- bis 3.600,- € je
laufendem Aktenmeter dienen.

Arbeitspaket 3: Durchführung von Testreihen

Im Verlauf des Projektes „Labest Papier“ haben sich viele in der Literatur zu findende Aspekte
bestätigt, manche erscheinen in neuem Licht und es haben sich neue Erkenntnisse ergeben.

Insbesondere wurde bei der Erarbeitung der Testreihen, bei denen auf existierende Normen
zur beschleunigten Alterung zurückgegriffen wurde, festgestellt, dass nicht alle Normen sinn-
voll angewendet werden können. Dies hatte zur Konsequenz, dass aufgrund der Recherchen
im Rahmen des Projektes „Labest Papier“ die Normen ISO 5630-6 und ISO 5630-7 (beschleu-
nigte Alterung bei Licht bzw. bei schädlichen Gasen) zurückgezogen wurden.

Klar bestätigt wurden die negativen Auswirkungen von Lignin, sowohl auf das Papier selbst,
in dem es enthalten ist, als auch auf benachbarte Papiere, wenn eine enge Zusammenlage-
rung stattfindet (siehe z. B. Abbildung 16 und Abbildung 24).

Klar bestätigt wurde auch die bessere Resistenz von Linters/Hadern sowie ligninfreiem, ge-
bleichtem Zellstoff gegenüber Alterung. Diese Resistenz beruht stark auf der Neutralfahrweise
und kann durch den Zusatz von Calciumcarbonat stabilisiert werden.

Gezeigt hat sich zudem, dass durch die Alterung alle mechanischen und optischen Eigen-
schaften der Papiere betroffen sind. Alle Eigenschaften können somit zur Beurteilung des Al-
terungsverhaltens herangezogen werden. Manche der Eigenschaften sind jedoch sehr
schwankend (z. B. Dauerbiegewiderstand oder Nullreißlänge) und eignen sich darum weniger
gut für eine Beurteilung. Andere zeigen klare Tendenzen (z. B. Durchreißwiderstand und Ar-
beitsaufnahmevermögen) und differenzieren gut (was z. B. bei der Bruchdehnung nicht immer
der Fall ist). Letztere wurden im Projekt stetig verwendet und können für künftige Forschungen
zur eventuellen Bestimmung einer Alterungsrate herangezogen werden.

Es finden sich deutliche Hinweise, dass die in DIN 6738 beschriebene Annahme, dass die Papierparameter bei der Alterung asymptotisch einem Grenzwert zustreben, richtig ist. Eine weitere Untersuchung könnte Aufschluss geben, ob daraus andere Kriterien für die Alterungsbeständigkeit abgeleitet werden können als sie heute verwendet werden. So könnte aus mindestens zwei Punkten einer angenommenen exponentiellen Alterungskurve eine Alterungsrate und daraus ein Tag errechnet werden, ab dem ein Mindestfestigkeitswert nicht mehr eingehalten wird. Ein gutes Kriterium scheint hierfür der Durchreißwiderstand zu sein. Dauerbiegewiderstand und Nullreißlänge habe sich als zu empfindlich erwiesen, diese Messungen unterliegen zu vielen Einflüssen. Die Bruchkraft ist deutlich unempfindlicher als der Durchreißwiderstand, der somit aus heutiger Erkenntnislage ein guter Kompromiss zu sein scheint.

Ebenso hat sich im Laufe des Projektes „Labest Papier“ gezeigt, dass die heute verwendeten Alterungszeiten von 6, 12 und 24 Tagen nicht ausreichend sind, um verlässliche Aussagen über die initiierten Senkungsraten der gemessenen Parameter zu machen. Teilweise kommt es sogar zu Reifungsprozessen und Anstiegen in einigen Festigkeitseigenschaften. Insofern haben sich die zusätzlichen, über diese Zeiträume hinausreichenden Messungen als richtig erwiesen. Als neue Empfehlung dient ein Alterungszeitraum von 2 Monaten bei mechanischen Eigenschaften. Optische Eigenschaften können kürzer getestet werden.

Nicht bestätigt haben sich die Befürchtungen, gestrichene Papiere könnten in den Bindemitteln verspröden oder durch Abbauprodukte die Alterung beschleunigen. Im Gegenteil, die Strichschicht kann eine Schutzfunktion haben und die Papiere zumindest an der optischen Alterung hindern. Nur das Inkjetpapier mit seiner Spezialbeschichtung blieb hinter den Erwartungen an ein holzfreies Papier zurück, weist aber dennoch eine voraussichtliche Alterungsbeständigkeit von fast ca. 2.800 Jahren auf.

Neu ist die gefundene Erkenntnis, dass Titandioxid als Füllstoff eine starke stabilisierende Wirkung auf die optischen Eigenschaften während der Alterung hat. Dies liegt an dessen hinsichtlich des Weißgrades hervorragenden und altersstabilen Eigenschaften. Neu ist auch, dass die fasermorphologischen Eigenschaften sich durch die beschleunigte Alterung ändern. Dieser Aspekt verdient eine weitere, genauere Untersuchung.

Deutlich wurde, dass die verschiedenen Druckverfahren einen unterschiedlichen Einfluss auf das Papier während des Druckvorgangs nehmen. Dies zeigt sich in messbaren Verminderungen der mechanischen Festigkeiten, kann aber einkalkuliert werden und exkludiert nicht bestimmte Papiere oder bestimmte Druckverfahren.

Nicht abschließend beantwortet werden konnte die Frage, inwieweit sich von der künstlich beschleunigten Alterung auf die natürliche Alterung schließen lässt. Die künstliche Alterung stellt sich als sehr scharf dar und ruft vermutlich Reaktionen hervor, die normalerweise bei

moderaten Temperaturen nicht ablaufen würden. Im Projekt zeigte sich ein interessanter Gleichlauf zwischen den bei 80 °C in Aluminiumfolie und bei 100 °C in Glasbehältern gealterten Proben auf. Diese Beobachtung könnte weiterverfolgt und mit Hilfe der Arrheniusgleichung zu mehr Klarheit in dieser Frage führen. Hingegen hat sich bestätigt, dass eine kühle Lagerung bei 4 °C die Eigenschaften eines Papierdokuments konserviert.

Die geforderte Haltbarkeit eines Dokuments von über 500 Jahren kann zwar nur abgeschätzt werden und hängt sehr stark von den tatsächlich durchlaufenen Temperatur-, Luftfeuchte und Lichtbedingungen ab. Die allgemeine Regel der ISO 20494, nach der 12 Tage künstliche Alterung bei 80 °C mit 35 Jahren natürlicher Alterung gleichgesetzt werden können, bedarf einer Fundierung durch mehr Daten. Dennoch lassen die verschiedenen im Rahmen des Projektes „Labest Papier“ getroffenen Ansätze zur Altersprognose den Schluss zu, dass selbst Recyclingpapier in der Lage ist, gesichert 500 Jahre als Dokumentträger zu dienen.

Licht und Strahlung waren keine beleuchteten Aspekte im Rahmen des Projektes „Labest Papier“. Diese Einflussfaktoren können durch sachgemäße Lagerung unschädlich gehalten werden.

Wichtig für das weitere Vorgehen ist, dass die Empfehlungen der einschlägigen Normen zu Schreibmitteln und Druckfarben und zu optimalen Lagerungsbedingungen Beachtung finden. Falsche Lagerung kann mehr schädigen als natürliche Alterung unter günstigen Bedingungen. Und nicht lichtechte Druckfarben/Schreibflüssigkeiten können den Verlust von Information hervorrufen.

Auch darf nicht vergessen werden, dass ausgewählte Papiere ihren Zweck im Büroalltag erfüllen sollen und diesbezüglich den Anforderungen der Normen (DIN EN 12281) und (DIN ISO 11798) genügen müssen. Die ISO 11798 befindet sich dabei aktuell in einer Überarbeitungsphase und wird vermutlich im Laufe des Jahres 2023 neu herausgegeben. Einige Messverfahren werden dabei neu definiert, z. B. wird für den Kontrast nicht mehr der Logarithmus der Helligkeitsdifferenz sondern direkt das Delta der Helligkeit mit und ohne Farbe herangezogen.

Die Auswahl eines geeigneten Papiers – Schreib-Druckstoffsystems ist somit kein Ergebnis mit nur einer möglichen Kombination, sondern sie ergibt sich aus der Beachtung der einschlägigen Normen und der im Rahmen des Projektes Labest Papier erarbeiteten Empfehlungen. Welche Qualitätsparameter und welche Anforderungen im Falle eines Einkaufs an ein solches Papier gestellt werden muss, können dem vorliegenden Bericht entnommen werden. Die konkrete Ausgestaltung muss zum aktuellen Zeitpunkt des Bedarfs erarbeitet werden.

Abschließend sei darauf verwiesen, dass auch die vorliegende Arbeit sich einschränken musste, um zeitlich und finanziell die gesteckten Rahmen nicht zu überschreiten. So mussten

z. B. biologische Prozesse unbeachtet bleiben, obwohl auch von dieser Seite nicht zu vernachlässigende Einflüsse auf die Alterung des Papiers zu vermuten sind.

6 Literaturverzeichnis

DIN ISO 14145-2, Februar 1999: 14145-2 Rollerballs und Rollerball-Minen Teil2: Anwendung für Dokumente (DOC).

Allscher, T.; Haberditzl, A. (2019): Bestandserhaltung und Dokumentation in Archiven und Bibliotheken. 1. Aufl. 2 Bände. Berlin: DIN.

Allscher, Thorsten; Ceynowa, Irmhild (2018): Mengenentsäuerung – Verfahrensvalidierung, Evaluierung und Qualitätssicherung. Neue Einsichten und bleibende Fragen. In: *ABI Technik* 38 (1), S. 16–28. DOI: 10.1515/abitech-2018-0004.

Anders, Manfred (2009): Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen des Massenentsäuerungsverfahrens des ZBF Leipzig. Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt AZ 25087/-21/2. Hg. v. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Andres, H. P.; et al. (2004): papersave swiss Massenentsäuerungsanlage - Erkenntnisse und Erfahrungen aus 4 Jahren Betrieb. Unter Mitarbeit von Hanspeter Andres, Markus Reist, Pascal Beer, Marcel Wälchli, Beat Vogelsanger. In: Bernard Bekavac, Josef Herget und Marc Rittberger (Hg.): Informationen zwischen Kultur und Marktwirtschaft. Proceedings des 9. Internationalen Symposiums für Informationswissenschaft (ISI 2004). Chur, 6.-8. Oktober 2004. 1 Band. Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft mbH, S. 65–83.

DIN EN 12281, Januar 2003: Anforderungen an Kopierpapier für Vervielfältigungen mit Trockentoner.

RAL-UZ 14 Anhang 4, 2014: Anhang 4 zur Vergabegrundlage RAL-UZ 14.

Aniela Bez (2021): Papierrestaurierung & Buchrestaurierung. Online verfügbar unter <https://www.buch-papier-restaurierung.de/>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2021, zuletzt geprüft am 17.02.2021.

Anon (1996): Papierzerfall stoppen. In: *Papiermacher Magazin* 46, 01.06.1996 (Papiermacher Magazin vol. 46, no. 6, 1 June 1996, p. 77 (C, K, S)), S. 77.

INGEDE Method 11, 2018-01: Assessment of print product recyclability – Deinkability test –, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Ausschuss für Fragen des Wertpapierdrucks (2000): Gemeinsame Grundsätze der deutschen Stand 17.04.2000 Wertpapierbörsen für den Druck von Wertpapieren. Online verfügbar unter <https://www.deutsche-boerse-cash-market.com/dbcm-de/meta/frankfurter-wertpapierboerse-regelwerke/Gemeinsame-Grunds-tze-der-deutschen-Wertpapierb-rsen-f-r-den-Druck-von-Wertpapieren-46232>, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Banik, G. (2013): Der Oddy Test - Möglichkeiten und Grenzen. Wissen Nr. 5. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Gerhard Baink. Hg. v. Klug Conservation. Online verfügbar unter <https://www.klug-conservation.de/Der-Oddy-Test-Moeglichkeiten-und-Grenzen>, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Bansa, Helmut (Hg.) (1980): Dauerhaftigkeit von Papier : Vorträge des 4. Internationalen Graphischen Restauratorentages ... Bückeberg 1979. Zeitschrift für Bibliothekswesen und Bibliographie. Sonderheft. Frankfurt am Main. bansa1980dauerhaftigkeit.

Bansa, Helmut (2002): Accelerated Ageing of Paper: Some Ideas on its Practical Benefit. In: *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material* 23 (2), S. 106–117. DOI: 10.1515/REST.2002.106.

Baranski, A. (2002): Ageing kinetics of cellulose and paper. In: *Restaurator* 23, S. 77–88. DOI: 10.1515/REST.2002.77.

Bégin, P. L.; Kaminska, E. (2002): Thermal Accelerated Ageing Test Method Development. In: *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material* 23 (2), S. 89–105. DOI: 10.1515/REST.2002.89.

DIN 50035, 2012-09: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien – Polymere Werkstoffe, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Behrens, U.; Ballerstedt, T.; Scherer, K. H.; Schmidt, R. E. (1994): Wissenschaftliche Arbeiten zur Ermittlung der optimalen Bedingungen für die Langzeitlagerung von archivalischem und bibliothekarischem Sammelgut. - Abschlussbericht. Bundesministerium für Forschung und Technologie (Förderkennzeichen NT 2056 3 / DBI. Nr. 7000). Eschborn: Batelle Ingenieurtechnik GmbH.

Bellendorf, Paul (2012): Der Einsatz von naturwissenschaftlichen Verfahren zur Sicherung von Archivgut. In: Anna Haberditzl (Hg.): Schadensprävention und Notfallvorsorge in Archiven : Vorträge des 71. Südwestdeutschen Archivtags am 21. Mai 2011 in Wertheim. Stuttgart. bellendorf2012schadensprvention, S. 55–64.

DIN ISO 5630-1, 1993-08: Beschleunigte Alterung Teil1: Trockenwärmebehandlung bei 105 °C, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

DIN EN 12283, 2003-01: Bestimmung der Tonerhaftung, zuletzt geprüft am 18.09.2020.

DIN 15549, 2016-04: Bild-Aufzeichnungsmaterialien – Materialien für Fotografien – Beschaffenheit von Aufbewahrungsmitteln, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Blechs Schmidt, Jürgen (2013): *Papierverarbeitungstechnik*. Mit 67 Tabellen. 1. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446431669>.

Böhringer, Dietmar (2012): *Barrierefreie Gestaltung von Kontrasten und Beschriftungen*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Barrierefrei für blinde und sehbehinderte Menschen, H. 3).

Bond, J. S.; Yu, X.; Agarwal, Umesh; Atalla, R. H.; Hunt, Christopher (Hg.) (2001): The aging of printing and writing papers upon exposure to light. Part I: optical and chemical changes due to long-term light exposure. 11th Inter. Symp. Wood Pulping Chemistry (2). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Umesh_Agarwal/publication/251875373_The_Aging_of_Printing_and_Writing_papers_upon_Exposure_to_Light_Part_1-Optical_and_chemical_changes_due_to_long_term_light_exposure/links/00b7d51f6e43ed22c4000000.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

Bonham, James S.; Rolniczak, Barbara (2006): Accelerated ageing of copy papers containing recycled fibre. In: *APPITA JOURNAL* 59 (5), S. 365–369.

Braudo, Serge (2020): *Dictionnaire juridique de Serge Braudo. Définition de Intangibilité*. Dictionnaire du droit privé. Hg. v. Serge Braudo. Online verfügbar unter <https://www.dictionnaire-juridique.com/definition/intangibilite.php>, zuletzt geprüft am 12.09.2020.

BStU (2021): *Rekonstruktion zerissener Stasi-Unterlagen*. Der Bundesbeauftragte für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik (BStU). Online verfügbar unter <https://www.bstu.de/archiv/rekonstruktion/>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2021, zuletzt geprüft am 03.03.2021.

Bülow, A.; Bégin, P.; Carter, H.; Burns, T. (2000): Migration of Volatile Compounds through Stacked Sheets of Paper during Accelerated Ageing. Part II: Variable Temperature Studies 21 (4), S. 187–203. DOI: 10.1515/REST.2000.187.

Bund-Länder-Arbeitsgruppe Papierzerfall (1992): *Bericht über Ursachen, Ausmaß, Wirkungen und Folgen des Papierzerfalls im Bibliotheks-, Archiv- und Verwaltungsbereich sowie Gegenmaßnahmen und Empfehlungen* : vom 15. Juni 1992. Berlin.

CAN/CGSB-9.70-2016 (2016): *Permanence of paper for records, books and other documents*. Standards Council of Canada - Conseil canadien des normes. Online verfügbar unter <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/28452>, zuletzt aktualisiert am 18.09.2020, zuletzt geprüft am 18.09.2020.

Cantu, Antonio A. (1988): Comments on the Accelerated Aging of Ink. In: *J. Forensic Sci.* 33 (3), 12483J. DOI: 10.1520/JFS12483J.

Cernic, M.; Vodopivec, J. (1997): Influence of Paper Raw Materials and Technological Conditions of Paper Manufacture on Paper Aging. In: *De @Restaurator*. - Groningen, 1982-1996. - ISSN 0921-4127 18 18 (2), S. 73–91. DOI: 10.1515/rest.1997.18.2.73.

Chemie.de (2021): Elektromagnetischer_Puls. Online verfügbar unter https://www.chemie.de/lexikon/Elektromagnetischer_Puls.html, zuletzt aktualisiert am 10.03.2021, zuletzt geprüft am 10.03.2021.

Chende Luo (1993): Lichtinduzierte Vergilbung von ligninhaltigen Faserstoffen und Vermeidungsstrategien. Dissetation. Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt. Institut für Papierfabrikation.

Chiriu, Daniele; Ricci, Pier Carlo; Cappellini, Giancarlo; Salis, Marcello; Loddo, Giorgia; Carbonaro, Carlo Maria (2018): Ageing of ancient paper: A kinetic model of cellulose degradation from Raman spectra. *Journal of Raman Spectroscopy*, 49(11), 1802-1811. In: *J Raman Spectrosc* 49 (11), S. 1802–1811. DOI: 10.1002/JRS.5462.

Cocca, M.; D'Arienzo, L.; D'Orazio, L. (2011): Effects of Different Artificial Agings on Structure and Properties of Whatman Paper Samples. *ISRN Materials Science*, 2011, 1-7. In: *ISRN Materials Science* 2011, S. 1–7. DOI: 10.5402/2011/863083.

Committee Manager ISO/TC6/SC2 (17.03.2023): Result Systematic review ISO 20494:2017, Paper — Requirements for stability for general graphic applications. Aktenzeichen: N 3648. Result Systematic review ISO 20494:2017 + Comments. ISO/TC 6/SC 2 "Test methods and quality specifications for paper and board".

TAPPI 430 cm-99, 1999: Copper number of pulp, paper, and paperboard.

Deutsche Umwelthilfe e.V. (2020): Druckchemikalie ITX nun auch in Karton-Säften von ALDI Süd. Online verfügbar unter <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/druckchemikalie-itx-nun-auch-in-karton-saeften-von-aldi-sued/>, zuletzt aktualisiert am 18.09.2020, zuletzt geprüft am 18.09.2020.

DIN-Taschenbuch 343 (2018): Information und Dokumentation. Bibliotheks- und Archivbau, Indexierung, Umschriften, Digitale Lanzeitarchivierung, Codierung. DIN-Taschenbuch 343. 4 // 4. Auflage, Stand der abgedruckten Normen: Oktober 2017. Berlin: Beuth Verlag GmbH; Beuth (DIN-Taschenbuch, 343).

UNI 10332, 01.03.2003: Documentation and information - Paper for documents - Requirements for highest permanence and durability, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

DONot (2020): Dienstordnung (DONot) | Notar.de. Hg. v. jeweilige Landesjustizverwaltung. Informationsportal der bundesnotarkammer. Online verfügbar unter <https://www.notar.de/der->

notar/berufsrecht/dienstordnung, zuletzt aktualisiert am 02.10.2020, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

DIN ISO 12040, 1998-01: Druck- und Reproduktionstechnik Drucke und Druckfarben Bestimmung der Lichtechtheit mit gefiltertem Xenon-Bogenlicht, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

DWDS - Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache (2020): unversehrt. Deutscher Wortschatz von 1600 bis heute. Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/unversehrt>, zuletzt geprüft am 12.09.2020.

TAPPI T453 sp-97, 1997: Effect of dry heat on properties of paper and board, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

TAPPI T 544 sp-03, 2003: Effect of moist heat on properties of paper and board, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

EFPG-Tappi, Grenoble (Hg.) (2001): 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Unter Mitarbeit von ATIP. 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Nizza, 11-14 Juni 2001. Association Technique des l'Industrie Papeterie. 3 Bände. Paris.

GOST 9.801-82, 01.07.1983: Einheitliches System des Korrosions- und Alterungsschutzes - Papier - Prüfverfahren durch Pilzresistenz.

Eva Sandås (2023): Reference pulp. Darmstadt/Espoo, 25.04.2023. E-Mail an Heinz Joachim Schaffrath.

DIN EN ISO 5270, 2022-12: Faserstoff - Laborblätter - Bestimmung der physikalischen Eigenschaften.

DIN EN ISO 5269-2, 2005-03: Faserstoffe - Laborblattbildung für physikalische Prüfungen - Teile 2: Rapid-Köthen-Verfahren.

Fellers, Christer et al. (1989): Ageing/Degradation of Paper. A literatur survey. Unter Mitarbeit von Hrister Fellers, Tommy Iverson, Tom Lindström, Thomas Bilsson, Mikael Rigdahl. STFI. Stockholm, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Förderverein Papierrestaurierung (2020): Konservierung und Restaurierung von Kunstwerken auf Papier, Archiv- und Bibliotheksgut. Beruf Studium Förderung. Hg. v. Förderverein Papierrestaurierung Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.foerderverein-papierrestaurierung.de/de/infobroschuere.html>, zuletzt geprüft am 17.02.2021.

Forsskahl I; Tylli H (2001): Accelerated aging studies of printing and writing papers. Part I: irradiation with filtered xenon light. In: Grenoble EFPG-Tappi (Hg.): 11th International Symposium on wood and pulping chemistry, Bd. 1. Unter Mitarbeit von ATIP. 11th International

Symposium on wood and pulping chemistry. Nizza, 11-14 Juni 2001. Association Technique des l'Industrie Papeterie. 3 Bände. Paris.

Freidenfelds, Vitalijs; Certova, J.; Mekss, P. (2016): The Determination of Signs of Accelerated Ageing of Records made with Ballpoint Pen Inks by Using Chromatography Methods. In: *J Forensic Res* 7 (4). DOI: 10.4172/2157-7145.1000337.

ISO 27668-2, 01.02.2009: Gel ink ball pens and refills - Part 2: Documentary use (DOC).

Genast 2021: Alterungsprozesse und deren Einfluss auf die Inkjet-Bedruckbarkeit von Faltschachtelkarton. Unter Mitarbeit von Sabine Genast. In: PTS Heideneau (Hg.): PTS-News 02/2021, S. 8–10.

DIN 32975, Dezember 2009: Gestaltung visueller Informationen im öffentlichen Raum zur barrierefreien Nutzung.

Gidlof et al. (2006): Critical Print Quality Factors during Digital Printing on Paperboard - a Subjective Evaluation. Unter Mitarbeit von Veronice Gidlof, Magnus Lestelius, Bjorn Kruse. In: Technical Association of the Graphic Arts (Hg.): TAGA Journal: SWANSEA PRINTING TECHNOLOGY LIMITED (2), S. 190–204. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Magnus_Lestelius/publication/237533259_Flexo_Print_of_Corrugated_Board_Mechanical_Aspects_of_the_Plate_and_Plate_Mounting_Materials/links/0f317536ba9186d8c2000000/Flexo-Print-of-Corrugated-Board-Mechanical-Aspects-of-the-Plate-and-Plate-Mounting-Materials.pdf#page=196, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

Vergabekriterien DE-UZ 14a, Januar 2020: Grafische Papiere und Kartons aus 100 % Altpapier (Recyclingpapier und –karton). Online verfügbar unter <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/de/DE-UZ%20014a-202001-de%20Kriterien-V5.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2023.

Green, Phil (2008): ISO 5 densitometry. Bringing one of the oldest international standards into the 21st century. London College of Communication. London, zuletzt geprüft am 01.03.2021.

Hebig, Dieter (2019): Zur Konformität der von der Firma Schempp Bestandserhaltung GmbH verarbeiteten Papierwerkstoffe mit den geltenden Normen sowie weiteren Vorgaben und Anforderungen. Schempp Bestandserhaltung, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

Hightech Forum (Hg.) (2021): Zusammen.Wachsen.Gestalten. Ergebnisbericht Hightech Forum 2019-2021, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

Hodgson, K. T. (1994): A review of paper sizing using alkyl ketene dimer versus alkenyl succinic anhydride. In: *Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper*

Industry Tb1. Appita. - Parksville, Victoria u.a. : Appita, 1969-. - ISSN 1038-6807 47 47 (5), S. 402–404.

ISO 18916, 2007-06: Imaging materials - Processed imaging materials - Photographic activity test for enclosure materials.

ISO 11108, 15.12.1996: Information and documentation — Archival paper — Requirements for permanence and durability. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/standard/1708.html>, zuletzt geprüft am 16.09.2020.

DIN ISO 11799, 2017-04: Information und Dokumentation - Anforderungen an die Aufbewahrung von Archiv-und Bibliotheksgut.

DIN ISO 11798, 2001-01: Information und Dokumentation - Alterungsbeständigkeit von Schriften, Drucken und Kopien auf Papier - Anforderungen und Prüfverfahren (ISO 11798:1999). Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/norm/din-iso-11798/36814176>, zuletzt geprüft am 04.08.2020.

DIN SPEC 67701, 2019-07: Information und Dokumentation - Bestandserhaltung für Archive und Bibliotheken. Online verfügbar unter <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-67701/306463202>, zuletzt geprüft am 04.08.2020.

DIN EN ISO 9706, 2010-02: Information und Dokumentation - Papier für Schriftgut und Druckerzeugnisse - Voraussetzungen für die Alterungsbeständigkeit (ISO 9706:1994).

DIN ISO 23404:2022-02: Information und Dokumentation – Papier und Pappe für die Verwendung in der Konservierung – Messung der Auswirkungen flüchtiger Schadstoffe auf Cellulose in Papier", zuletzt geprüft am 31.03.2023.

DIN ISO 16245, 2012-05: Information und Dokumentation - Schachteln, Archivmappen und andere Umhüllungen aus zellulosehaltigem Material für die Lagerung von Schrift- und Druckgut aus Papier und Pergament (ISO_16245:2009).

INGEDE (2020): INGEDE News Sommer 2020 – INGEDE-Symposium Verpackungsdesign. Online verfügbar unter <http://pub.ingede.com/ingede-news-sommer-2020/>, zuletzt aktualisiert am 17.09.2020, zuletzt geprüft am 18.09.2020.

ISEGA (2020): ISEGA Forschungs- und Untersuchungsgesellschaft mbH Prüflabor Mikrobiologie. Online verfügbar unter https://www.isega.de/Prueflabor/Mikrobiologie/DE_index_1739.html, zuletzt aktualisiert am 21.09.2020, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

ISRI (2013): Scrap Specifications Circular 2013. Institute of Scrap Recycling Industries, Inc. Washington, DC 20036-5664. Online verfügbar unter www.isri.org.

iurNetwork UG (2020): Körperliche Unversehrtheit. Online verfügbar unter <https://www.iura-student.de/definition/k%C3%B6rperliche-unversehrtheit>, zuletzt geprüft am 12.09.2020.

J.G. (1932): The Deterioration of Paper on Ageing. In: *Nature* (130), S. 320. DOI: 10.1038/130320a0.

Kaltenbach, Josef (1974): Die neuzeitliche Papierleimung und deren Nebenprobleme : mit 70 Tab. im Text. 2., neu bearb. Aufl. Walluf (Bd. 12).

Kantrowitz, M. S. et al. (1940): Permanence and durability of paper. An annotated bibliography of the technical literature from 1885 A.D. to 1939 A.D. Unter Mitarbeit von Morris S. Kantrowitz, Robert Henry Simmons und Ernest W. Spencer. Washington: U.S. Govt. Print. Off (United States. Government Printing Office. Technical bulletin no. 22).

KEK (2021): Projektliste KEK - Stand 12.02.2021. Hg. v. Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts. Online verfügbar unter <https://www.kek-spk.de/projektliste?term=>, zuletzt geprüft am 25.02.2021.

Kipphan, Helmut (Hg.) (2000): Handbuch der Printmedien. Technologien und Produktionsverfahren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kobold, Maria; Moczarski, Jana (2010): Bestandserhaltung. Ein Ratgeber für Verwaltungen, Archive und Bibliotheken. 1. Aufl. Darmstadt: Hessische Historische Kommission, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts (2021): KEK-Portal | Glossar. Online verfügbar unter <https://www.kek-spk.de/glossar>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2021, zuletzt geprüft am 11.02.2021.

Koura, A.; Krause, T. (1977): Die Alterung von Papier. I. Untersuchung über die Alterung ligninfreier Faserstoffe. In: *Das Papier* 31 (@10A), V9-V16.

Koura, A.; Krause, T. (1979): Die Alterung von Papier. V. Beeinflussung der Alterungsbeständigkeit und Reaktivierung gealterter Papiere mit flüssigem Ammoniak und Ammoniaklösungen. In: *Das Papier* 33 (4), S. 142–147.

Krainer, Sarah; Saes, Louis; Hirn, Ulrich (2020): Predicting inkjet dot spreading and print through from liquid penetration- and picoliter contact angle measurement (1).

Kriese, Sven (2019): Durchführung von Massenentsäuerungsprojekten Gemeinsames Grundlagenpapier. · des Bestandserhaltungsausschusses der Konferenz der Leiterinnen und Leiter der Archivverwaltungen des Bundes und der Länder, · der Bundeskonferenz der Kommunalarchive beim Deutschen Städtetag und · der Kommission Bestandserhaltung des Deutschen Bibliotheksverbandes., zuletzt geprüft am 05.03.2021.

DIN ISO 12757-2, 1999-02: Kugelschreiber und Kugelschreiberminen Teil 2: Anwendung für Dokumente (DOC).

Kultusministerkonferenz (17.02.1995): Empfehlung der Kultusministerkonferenz zur Erhaltung der vom Papierzerfall bedrohten Archivbestände. Beschluss Nr. 2138.

DIN EN ISO 4892-2, 06/2013: Kunststoffe – Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten – Teil 2: Xenonbogenlampen, zuletzt geprüft am 11.11.2020.

Le, P. C.; Potts, M.; Hofer, H. H. (2000): Alterungsbeständigkeit von Papieren, die im Non-Impact-Verfahren bedruckt wurden. In: *WOCHENBLATT FÜR PAPIERFABRIKATION* 128 (5), S. 282–289.

Leopold, Karsten (2020): BASE_Papierdokumente, festgestellte Schäden_06.11.2020, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Lindquist et al. (2006): Interaction characteristics in different applications of inke-jet printing. Unter Mitarbeit von Ulf Lindquist, Liisa Hakola, Jali Heilmann, Boris Zhmud, Eva Wallström. In: Technical Association of the Graphic Arts (Hg.): *TAGA Journal*, Bd. 2: SWANSEA PRINTING TECHNOLOGY LIMITED (2), S. 99–109.

LOEWE-Projekt MOSLA (Hg.) (2021): MOSLA – Molekulare Speicher zur Langzeit-Archivierung. Online verfügbar unter <https://mosla.mathematik.uni-marburg.de/>, zuletzt aktualisiert am 09.12.2021, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

LVR-AFZ (2021): Über uns - Archive im Rheinland. Landschaftsverband Rheinland - Archivberatungs- und Fortbildungszentrum. Online verfügbar unter https://afz.lvr.de/de/ueber_uns/ueber_uns.html#, zuletzt aktualisiert am 10.02.2021, zuletzt geprüft am 11.02.2021.

Marie Cristina Area et al. (2011): Paper ageing and degradation: recent findings and methods. In: *BioResources* 6 (4), S. 5307–5337. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/235354060_Paper_aging_and_degradation_Recent_findings_and_research_methods, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Martorana, Emanuele (2010): Untersuchungen zur Papierleimung mit Alkenylbernsteinsäureanhydrid (ASA). Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.). Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Institut für Holz- und Pflanzenchemie. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-86517>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Mikut, Ralf (Hg.) (2004): Proceedings / 14. Workshop Fuzzy-Systeme und Computational Intelligence. Dortmund, 10. - 12. November 2004. Unter Mitarbeit von Ralf Mikut. Workshop

Fuzzy-Systeme und Computational Intelligence. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Informatik - Automatisierungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, Bd. 6). Online verfügbar unter http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2004/24/pdf/Workshop_Fuzzy_Systeme_14.pdf.

National Archives of Australia (2019): Rules for 'Archival Quality' trademark. Online verfügbar unter <https://www.naa.gov.au/information-management/store-and-preserve-information/preserving-information/preserving-paper-files/rules-archival-quality-trademark>, zuletzt geprüft am 11.09.2020.

NDA (2019): Doc No: IMP06 - Managing NDA Information Requirements. Hg. v. Nuclear Decommissioning Authority (NDA). NDA, zuletzt geprüft am 11.11.2020.

Nitrochemie (2020): Papierentsäuerung. papersave – Originalen eine Zukunft schenken. Online verfügbar unter https://www.nitrochemie.com/de/nitrochemie_group/produkte/papersave_swiss_1/index.php, zuletzt geprüft am 12.09.2020.

Office for Nuclear Regulation (2019): Duty Holder Management of Records. ONR. Online verfügbar unter http://www.onr.org.uk/operational/tech_asst_guides/ns-tast-gd-033.pdf, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

Ottmar (2007): Re: Knochenleim, zweite Erfahrungen. Online verfügbar unter http://www.woodworking.de/cgi-bin/forum/webbbs_config.pl/md/read/id/26278/sbj/knochenleim-zweite-erfahrungen/, zuletzt aktualisiert am 05.03.2021, zuletzt geprüft am 05.03.2021.

ISO 20494, 2017-12: Paper - Requirements for stability for general graphic applications.

DIN 6738, 2007-03: Papier und Karton – Lebensdauerklassen.

DIN ISO 5630-3, 1997-06: Papier und Pappe - Beschleunigte Alterung - Teil 3: Feuchtwärmebehandlung bei 80 °C und 65 % relativer Luftfeuchte.

DIN ISO 5630-4, 2017-03: Papier und Pappe – Beschleunigte Alterung – Teil 4: Trockenwärmebehandlung bei 120 oder 150 °C, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

DIN ISO 5630-5, 2017-03: Papier und Pappe – Beschleunigte Alterung – Teil 5: Beanspruchung bei einer erhöhten Temperatur von 100 °C, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

DIN ISO 5630-6, 2017-03: Papier und Pappe - Beschleunigte Alterung - Teil 6: Einwirkung von atmosphärischen Verunreinigungen (Stickstoffdioxid).

DIN ISO 5630-7, 2017-03: Papier und Pappe - Beschleunigte Alterung - Teil 7: Einwirkung von Licht.

DIN EN 643, 2014-11: Papier, Karton und Pappe – Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten; Deutsche Fassung.

Paulsson, M.; Parkas, J. (2001): Long-term natural aging of untreated and chemically modified high-yield pulps. In: Grenoble EFPG-Tappi (Hg.): 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Unter Mitarbeit von ATIP. 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Nizza, 11-14 Juni 2001. Association Technique des l'Industrie Papeterie. 3 Bände. Paris.

PC Games Hardware (Hg.) (2019): Quarzglas als Speicher: Video zeigt die Funktionsweise. Online verfügbar unter <https://www.pcgameshardware.de/Cloud-Gaming-und-Computing-Thema-233460/Videos/Quarzglas-als-Speicher-1336282/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2019, zuletzt geprüft am 10.12.2021.

ANSI/NISO Z39.48-1992 (R2009), 2010: Permanence of Paper for Publications and Documents in Libraries and Archives. Online verfügbar unter https://groups.niso.org/apps/group_public/download.php/13464/Z39-48-1992_r2009.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2020.

Pescatore, Claudio; Palm, Jonas (2020): Preserving Memory and Information on Heritage and on Unwanted Legacies - New Tools for identifying Sustainable Strategies to Prepare and Support Decision Making by Future Generations. Online verfügbar unter <https://literaryarchives.files.wordpress.com/2020/07/scearnewsletter2020-1june30.pdf>, zuletzt geprüft am 02.05.2023.

Petra Schulz (2021): Vergilbtes Papier wieder Aufhellen. Papier bleichen - so gehen Sie bei vergilbten Stellen vor. Online verfügbar unter https://www.helpster.de/papier-bleichen-so-gehen-sie-bei-vergilbten-stellen-vor_108994, zuletzt aktualisiert am 02.03.2021, zuletzt geprüft am 02.03.2021.

ISO 5-3, 2009-12: Photography and graphic technology - Density measurements - Part 3: Spectral conditions.

Podbregar, Nadja (2021): Forscher lesen historische Briefe – ungeöffnet. In: *Scinexx - Das Wissensmagazin*, 03.03.2021. Online verfügbar unter <https://www.scinexx.de/news/geowissen/forscher-lesen-briefe-aus-der-renaissance-ungeoeffnet/>, zuletzt geprüft am 10.03.2021.

Porck, Henk (2000): Rate of Paper Degradation. The Predictive Value of Artificial Aging Tests. European Commission on Preservation and Access. Amsterdam. Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwizp_rF

tujrAhXIGuwKHbU3A08QFjAlegQICRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.loc.gov%2Fpreservation%2Fresources%2Frt%2FAcceleratedAging.pdf&usg=AOvVaw2_aZw-BkaF_m_j_nr6BXgu, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Preston et al. (2006): Interactions between UV curing offset inks and coated paper - Part1. Laboratory investigations. Unter Mitarbeit von Dr. Janet Preston, Dr. Sanna Rousu, Dr. Roger Wygant, John Parsons, Dr. Peter herad, Dr. Len Gate. In: Technical Association of the Graphic Arts (Hg.): TAGA Journal: SWANSEA PRINTING TECHNOLOGY LIMITED (2), S. 82–98.

ProLOEWE (Hg.) (2019): LOEWE-Schwerpunkt MOSLA. Hg. v. Pro LOEWE, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

DIN 53109, 2008-05: Prüfung von Papier und Pappe – Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren, zuletzt geprüft am 19.09.2020.

ISO 302, 2015-08: Pulps - Determination of Kappa number.

Restaurierungsausschuss (2002): Maßnahmen zur Restaurierung und Konservierung in den staatlichen Archivverwaltungen. ARK-Auftrag Restaurierungsmaßnahmen. Hg. v. Landesarchiv BW. Online verfügbar unter www.landesarchiv-bw.de, zuletzt geprüft am 02.03.2021.

Reverso Context - englisch (2020): Unversehrtheit - integrity, intactness, inviolability. Online verfügbar unter <https://context.reverso.net/%C3%BCbersetzung/deutsch-englisch/Unversehrtheit>, zuletzt geprüft am 12.09.2020.

Reverso Context - französisch (2020): Unversehrtheit -intégrité, intangibilité. Online verfügbar unter <https://context.reverso.net/%C3%BCbersetzung/deutsch-franzosisch/Unversehrtheit>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Schaffrath, Heinz-Joachim (2020): Telko „Labest Papier“ mit Dr. Kistenich-Zerfaß – GZ BASE 62140, zuletzt geprüft am 12.02.2021.

Schmidt, John A.; Rye, Carl S.; Gurnagul, Norayr (1995): Lignin inhibits autoxidative degradation of cellulose. In: *Polymer Degradation and Stability* 49 (2), S. 291–297. DOI: 10.1016/0141-3910(95)87011-3.

DIN 5008, 2020-03: Schreib- und Gestaltungsregeln für die Text- und Informationsverarbeitung, zuletzt geprüft am 21.09.2020.

DIN 1450, April 2013: Schriften – Leserlichkeit.

Shahani, C. (1995): Accelerated Aging of Paper: Can it Really Foretell the Permanence of Paper. Proceedings from the ASTM/ISR Workshop on the Effects of Aging on Printing and

Writing Papers. Library of Congress - Preservation Directorate. Philadelphia, PA. Online verfügbar unter <https://www.loc.gov/preservation/resources/rt/AcceleratedAging.pdf>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Shahani, C. et al (2001): Accelerated aging of paper: I. Chemical analysis of degradation products. II. Application of Arrhenius relationship. III. Proposal for a new accelerated aging ... Unter Mitarbeit von C Shahani, SB Lee, FH Hengemihle, G Harrison.

Siller-Grabenstein, Almut (1989): Untersuchungen über die Festigung von Schreibmitteln auf Papier als Voraussetzung für Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen in Archiven.

Target, D. (2020): Reviewing and understanding ink. In: *Corrugated Today* 16 (4), S. 64–69.

Team Finanz-Tools (2021): Inflationsraten Deutschland: Tabelle der Jahre 1992 - 2020. Online verfügbar unter <https://www.finanz-tools.de/inflation/inflationsraten-deutschland>, zuletzt aktualisiert am 04.03.2021, zuletzt geprüft am 04.03.2021.

Technical Association of the Graphic Arts (Hg.) (2006): TAGA Journal: SWANSEA PRINTING TECHNOLOGY LIMITED (2). Online verfügbar unter [https://scholar.google.com/scholar?q=Lindqvist%2C%20U.%2C%20Hakola%2C%20L.%2C%20Heilmann%2C%20J.%2C%20Zhmud%2C%20B.%2C%20Wallstr%C3%B6m%2C%20E.%20\(2006\)%20Interaction%20Characteristics%20in%20Different%20Applications%20of%20Ink-Jet%20Printing.%20TAGA%20J.%202%3A99%E2%80%93109.](https://scholar.google.com/scholar?q=Lindqvist%2C%20U.%2C%20Hakola%2C%20L.%2C%20Heilmann%2C%20J.%2C%20Zhmud%2C%20B.%2C%20Wallstr%C3%B6m%2C%20E.%20(2006)%20Interaction%20Characteristics%20in%20Different%20Applications%20of%20Ink-Jet%20Printing.%20TAGA%20J.%202%3A99%E2%80%93109.), zuletzt geprüft am 15.09.2020.

Tétreault, J.; Bégin, P.; Paris-Lacombe, S.; Dupont, A.-L. (2019): Modelling considerations for the degradation of cellulosic paper. In: *Cellulose* 26 (3), S. 2013–2033. DOI: 10.1007/s10570-018-2156-x.

TonerPartner.de (2021): Thermodrucker – Vielseitig, vorteilhaft, praktisch | günstig kaufen – TonerPartner.de. Online verfügbar unter <https://www.tonerpartner.de/thermodrucker/#3.4.%20Nachteile>, zuletzt aktualisiert am 04.03.2021, zuletzt geprüft am 04.03.2021.

Tylli, H.; Forsskahl, I. (2001): A spectroscopic study of the long-term moderate temperature aging of high-yield pulps. In: Grenoble EFPG-Tappi (Hg.): 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Unter Mitarbeit von ATIP. 11th International Symposium on wood and pulping chemistry. Nizza, 11-14 Juni 2001. Association Technique des l'Industrie Papeterie. 3 Bände. Paris.

University of Southampton (Hg.) (2016): Eternal 5D data storage could record the history of humankind | University of Southampton. University of Southampton. Online verfügbar unter

<https://www.southampton.ac.uk/news/2016/02/5d-data-storage-update.page>, zuletzt aktualisiert am 14.10.2021, zuletzt geprüft am 14.10.2021.

van DEVENTER, R.; HAVERMANS, J.; BERKHOUT, S. (1995): A comparison of three durability standards for paper. In: *Restaurator* 16 (3).

VDP (2020): Papier 2020 - Ein Leistungsbericht. Verband Deutscher Papierfabriken e. V. Bonn, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. (Hg.) (2003): Papiermachertaschenbuch. Unter Mitarbeit von Dr. Wilhelm Kipper, Dr. Walter Wernisch, Wolfgang Felsch, Dr. Hanns-Lutz Dalpke. Vereinigung der Arbeitgeberverbände der Deutschen Papierindustrie e.V. 8. Aufl. 1 Band. Zürich/Wien/Berlin: Dr. Curt Häfner Verlag GmbH.

Walenski, W. (2003): Lebensverlängerung. Über die Alterungsbeständigkeit und Massenentsäuerung von Papier. In: *Druck&Medien-Magazin* 4 (8), S. 40–41.

WELT (2015): Fast 10.000 Jahre alt: Das ist der älteste Baum der Welt. In: *WELT*, 29.12.2015. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article160310407/Das-ist-der-aelteste-Baum-der-Welt.html>, zuletzt geprüft am 20.09.2020.

Weyermann, Céline (2005): Mass Spectrometric Investigation of the aging processes of ballpoint ink for the examination of questioned documents. Online verfügbar unter <http://dnb.info/978891155/34>, zuletzt geprüft am 17.09.2020.

Weyermann, Céline; Spengler, Bernhard (2008): The potential of artificial aging for modelling of natural aging processes of ballpoint ink. In: *Forensic science international* 180 (1), S. 23–31. DOI: 10.1016/j.forsciint.2008.06.012.

Wikipedia (Hg.) (2020a): Anfasern. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Anfasern&oldid=200762482>, zuletzt aktualisiert am 08.06.2020, zuletzt geprüft am 18.02.2021.

Wikipedia (Hg.) (2020b): Papierfischchen. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Papierfischchen&oldid=206448605>, zuletzt aktualisiert am 11.12.2020, zuletzt geprüft am 16.02.2021.

Wikipedia (Hg.) (2021): Hexadezimalsystem. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Hexadezimalsystem&oldid=217925673>, zuletzt aktualisiert am 05.12.2021, zuletzt geprüft am 09.12.2021.

TAPPI 231 cm-96, 1996: Zero-span breaking strength of pulp (dry zero-span tensile).

Zervos, Spiros (2010): Natural and accelerated ageing of cellulose and paper: a literature review. ResearchGate. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/228734964_Natural_and_Accelerated_Ageing_of_Cellulose_and_Paper_A_Literature_Review, zuletzt geprüft am 14.09.2020.

Zervos, Spiros; Moropoulou, Antonia (2005): Cotton Cellulose Ageing in Sealed Vessels. Kinetic Model of Autocatalytic Depolymerization. In: *Cellulose* 12 (5), S. 485–496. DOI: 10.1007/s10570-005-7131-7.

Zou, J.; Page, D. H.; Stone, R. (2006): A rapid Method for Relative Determination of Paper Performance. In: *Journal of Pulp and Paper Science* (2), S. 80–82.

7 Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen:

Abbildung 1 Konformitätssymbol nach (DIN EN ISO 9706)	31
Abbildung 2 „Archival Quality“ Trademark (National Archives of Australia 2019)	32
Abbildung 3 Ergebnisbericht auf DNA in braunem Glasbehälter (Quelle: Dr. Schaffrath).....	54
Abbildung 4 Speichern auf Quarz (Quelle: (University of Southampton (Hg.) 2016)).....	55
Abbildung 5 Fichte in Schweden, 9.500 Jahre alt (Quelle: Reuters, Alister Doyle).....	59
Abbildung 6 Cockling an einem gebundenen Buch (Quelle: V&A Photographic Studio)	63
Abbildung 7 Von Säurefraß betroffenes Papier (Quelle: Wikipedia – Papierzerfall)	66
Abbildung 8 verblasstes Foto nach und vor der Bearbeitung (Quelle: Lichtbildklinik.de).....	68
Abbildung 9 vergilbte Zeitung (Quelle: Prof. Blumes Medienangebot: Papier)	69
Abbildung 10 Papierdokument mit Faltungen (Quelle: Dr. Heinz Joachim Schaffrath).....	107
Abbildung 11 Veranschaulichung Probenumfang (Quelle: Dr. Heinz Joachim Schaffrath)..	121
Abbildung 12 Beispiele verwendeter Geräte (Quelle. Dr. Heinz Joachim Schaffrath)	122
Abbildung 13 Linters – Verlauf mech. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung Teil 1	128
Abbildung 14 Linters – Verlauf mech. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung Teil 2	129
Abbildung 15 Linters – in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert.....	130
Abbildung 16 Linters – in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert.....	131
Abbildung 17 CTMP – Verlauf der Festigkeiten 0 – 16 Monate Alterung Teil 1	132
Abbildung 18 CTMP – Verlauf der Festigkeiten 0 – 16 Monate Alterung Teil 2.....	133
Abbildung 19 CTPM in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert	134
Abbildung 20 CTMP in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert	135
Abbildung 21 NBSK – Verlauf mechanischer Eigenschaften 0 - 16 Monate gealtert Teil 1 .	136
Abbildung 22 NBSK – Verlauf mechanischer Eigenschaften 0 - 16 Monate gealtert Teil 2 .	137
Abbildung 23 NBSK in verschiedenen Varianten 6 Monate gealtert.....	138
Abbildung 24 NBSK in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert.....	139
Abbildung 25 CTMP – Alterung in Alu bei 80 °C und in Glas bei 100 °C.....	141
Abbildung 26 Hadernpapier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung	142
Abbildung 27 Recyclingkopierpapier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung	143

<hr/>	
Abbildung 28 Kopierpapier ISO 9706 konform – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung	144
Abbildung 29 Inkjet-Papier – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung.....	145
Abbildung 30 holzfrei gestrichen – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung...	146
Abbildung 31 holzhaltig gestrichen – Verlauf mech. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung	147
Abbildung 32 holzhaltig natur – unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert.....	148
Abbildung 33 Bibeldruckpapier – unbedruckt, in Alu im bei 80 °C/65 % LF gealtert.....	148
Abbildung 34 Linters – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung.....	159
Abbildung 35 CTMP – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung	161
Abbildung 36 NBSK – Verlauf opt. Eigenschaften 0 – 16 Monate Alterung.....	162
Abbildung 37 Linters – in verschiedenen Varianten 16 Monate gealtert.....	163
Abbildung 38 Hadernpapier – Verlauf opt. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung.....	164
Abbildung 39 Recyclingkopierpapier – Verlauf opt. Eigenschaften 0 - 16 Monate Alterung	165
Abbildung 40 Kopierpapier ISO 9706 konform – Weißgradverlauf mit und ohne UV.....	167
Abbildung 41 Inkjet-Papier – Weißgradverlauf mit und ohne UV	169
Abbildung 42 holzfrei gestrichen – Weißgradverlauf mit und ohne UV.....	170
Abbildung 43 holzhaltig gestrichen – Weißgradverlauf mit und ohne UV	171
Abbildung 44 holzhaltig natur (ungestrichen) – Weißgradverlauf mit und ohne UV.....	172
Abbildung 45 Bibeldruckpapier – Weißgrad- und Verlauf der Helligkeit L*	173
Abbildung 46 Verwendete Druckvorlagen.....	176
Abbildung 47 Kontrastverlauf einer Probenbeschriftung	179
Abbildung 48 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, 23 °C, 50 % LF).....	188
Abbildung 49 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C, 65 % LF)	189
Abbildung 50 Linters – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C).....	189
Abbildung 51 Linters – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten.....	190
Abbildung 52 Linters – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten.....	191

Abbildung 53 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, Normklima 23 °C, 50 % LF)	192
Abbildung 54 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	192
Abbildung 55 CTMP – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen bei 100 °C)	193
Abbildung 56 CTMP – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 9 Monaten	193
Abbildung 57 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (unverpackt, Normbedingungen 23 °C, 50 % LF)	194
Abbildung 58 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	195
Abbildung 59 NBSK – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen)	195
Abbildung 60 NBSK – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 9 Monaten	196
Abbildung 61 NBSK – Einfluss der Lagerungsarten auf die chemischen Parameter nach 16 Monaten	196
Abbildung 62 Hadernpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	198
Abbildung 63 Büropapiere – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	199
Abbildung 64 Kopierpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (Lagerung in geschlossenen Gefäßen)	200
Abbildung 65 Kopierpapier – Vergleich unterschiedlicher Lagerungsbedingungen auf die chemischen Parameter nach 6 Monaten	201
Abbildung 66 Bibeldruckpapier – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	201
Abbildung 67 Holzhaltig unbedruckt – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	202
Abbildung 68 holzfrei gestrichen – Einfluss der Lagerungsdauer auf die chemischen Parameter (verpackt in Aluminiumfolie, Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	203
Abbildung 69 Vergleich chemische Parameter Bibeldruckpapier unbedruckt und mit schwarzem Tiefdruck bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF)	204

Abbildung 70 Vergleich chemische Parameter Kopierpapier ISO 9706 konform unbedruckt und mit Trockentoner bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF).....	205
Abbildung 71 Vergleich chemische Parameter holzfrei, gestrichenes Papier unbedruckt und mit Offset bedruckt (Lagerung bei 80 °C/65 % LF).....	206
Abbildung 72 Total-Ionenchromatogramm holzhaltig natur, Offset bedruckt, ungealtert mit Angabe des VOC- und des SVOC-Bereiches	207
Abbildung 73 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Faserstoffproben (ungealtert sowie nach 6 Monaten Lagerung im Kühlraum bei 4 °C und bei 80 °C/65 % LF)	208
Abbildung 74 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Industripapieren (ungealtert, unbedruckt).....	209
Abbildung 75 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in Recyclingkopierpapier (unbedruckt) während der Lagerung im Klimaschrank (80 °C/65 % LF).....	210
Abbildung 76 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen in bedruckten Industripapierproben (ungealtert)	211
Abbildung 77 Konzentration an VOC-/SVOC-Stoffen bei der Lagerung von bedruckten Industripapierproben (Lagerung im Klimaschrank bei 80 °C/65 % LF)	212
Abbildung 78 Linters – Verlauf des Variationskoeffizienten über die Alterung.....	214
Abbildung 79 CTMP – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung.....	215
Abbildung 80 NBSK – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung	216
Abbildung 81 Recyclingpapier – Verlauf der Variationskoeffizienten über die Alterung.....	216
Abbildung 82 Recyclingkopierpapier - Vergleich Standardabweichung/Variationskoeffizient.....	217

Tabellen:

Tabelle 1 Vergleich verschiedener Normen/Anforderungen zur Beständigkeit von Papier	48
Tabelle 2 Clusterung der vom BASE genannten Schäden.....	71
Tabelle 3 Arbeiten an behördlichem Schriftgut vor Einlagerung.....	98
Tabelle 4 Gegenüberstellung Laborpapiere zu Norm-Anforderungen	140
Tabelle 5 Gegenüberstellung Industripapiere zu Norm-Anforderungen	150
Tabelle 6 Vergleich Industripapiere – Absolutwerte unbedruckt/bedruckt	153
Tabelle 7 Vergleich Industripapiere – Differenz unbedruckt/bedruckt	154
Tabelle 8 Sondersorten – Eigenschaften Transparent und Blaupause	156
Tabelle 9 Sondersorten – Eigenschaften Signa Set rot.....	157
Tabelle 10 Linters - in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	160
Tabelle 11 CTMP - in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	162
Tabelle 12 NBSK – in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	163
Tabelle 13 Hadernpapier unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	164
Tabelle 14 Recyclingkopierpapier unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	166
Tabelle 15 Kopierpapier holzfrei, weiß ISO 9706 konform – unbedruckt, in Alu gealtert - Verlauf von Farbort und s + k.....	168
Tabelle 16 Inkjet-Papier - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	169
Tabelle 17 holzfrei gestrichen - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	170
Tabelle 18 holzhaltig gestrichen - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	172
Tabelle 19 holzhaltig natur (ungestrichen) - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	173
Tabelle 20 Bibeldruckpapier - unbedruckt, in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert – Verlauf von Farbort und s + k.....	174
Tabelle 21 Bedruckte Papiere - Kontrastbeurteilung vor/nach Alterung 16 Monate	177
Tabelle 22 Farbdifferenz ΔE vor und nach einer Alterung von 16 Monaten	177
Tabelle 23 Sondermessungen – Alterung div. Schreibstoffe.....	178

Tabelle 24 Helligkeits- und Farbortdifferenz bei Kuli-Beschriftung	180
Tabelle 25 CTMP - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gealtert – Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert	181
Tabelle 26 CTMP - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gealtert – Allgemeine Parameter ungealtert/6 Monate gealtert	183
Tabelle 27 Linters - 6 Monate bei 80 °C oder 4 °C gealtert – Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert	184
Tabelle 28 NBSK - 6 Monate bei 80°C oder 4°C gelagert - Fasermorphologie ungealtert/6 Monate gealtert	185
Tabelle 29 Recyclingpapier – unbedruckt in Alu bei 80 °C/65 % LF gealtert - Fasermorphologie ungealtert/ 12Tage/ 16 Monate gealtert.....	186
Tabelle 30 Übersicht über Anforderungen an chemische Parameter für alterungsbeständige Papiere	187
Tabelle 31 Übersicht über chemische Parameter der drei Büropapiere (ungealtert)	198
Tabelle 32 Übersicht über chemische Parameter aller untersuchten Industripapiere (ungealtert)	203
Tabelle 33 Übersicht über chemische Parameter der Sondersorten	206
Tabelle 34 Industripapiere unbedruckt – Lebensdauerfaktor nach 3 Monaten Alterung	219
Tabelle 35 Theoretische Papierhaltbarkeit bis zum Sanierungsbedarf.....	221
Tabelle 36 Theoretischer Umrechnungsfaktor beschleunigt/natürlich gealtert bei unterstellten 500 Jahren Alterungsbeständigkeit	222

8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung:	Bezeichnung:
α	α-Cellulose; ein durch Alkaliextraktion von Hemicellulosen befreiter Faserstoff aus Cellulose
ANSI	American National Standards Institute
ANSI/NISO	ANSI/National Information Standards Organization
AKD	Alkyketendimer
ASA	Alkaline Succinid Anhydride (Alkylbernsteinsäureanhydrid)
ASTM	American Society for Testing Materials
ASTM/ISR	ASTM/Institute for Standard Research
ATIP	Association Technique de l'Industrie Papeterie
CAN/CBSG	Canada/Canadien General Standard Board
CD	Cross Direction (Querrichtung)
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CMC	Carboxymethylcellulose (z. B. Tapetenkleister)
CTMP	Chemo Thermomechanical Pulp
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DFZ	Doppelfalzzahl
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN SPEC	DIN Specification
DIPN	Di-Iso-Propyl-Naphtalin
DP	Durchschnittlicher Polymerisationsgrad
EMP	electromagnetic pulse
ETO	Ethylenoxid (C ₂ H ₄ O)
FAS	Formamidinsulfinsäure
FOGRA	Forschungsinstitut für Medientechnologien e.V.
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
GC/MS	Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie
HEPA	High Efficiency Particulate Air (eine Filterklasse)
hf'	holzfrei
hh'	holzhaltig
IPM	Integrated pest management
IR	Infrarot
ISO	International Standardisation Organisation
ISO/DIS	ISO-Draft International Standard

Abkürzung:	Bezeichnung:
ISO/TR	ISO-Technical Report
ISO/TS	ISO-Technical Specification
ITX	Isopropylthioxanton
KEK	Koordinierungsstelle für die Erhaltung schriftlichen Kulturguts
KWE	Kaltwasserextrakt
LDI-MS	Laser-Desorptions-/Ionisations-Massenspektrometrie
LDK	Lebensdauerklasse
LED	Light Emission Diode
LF	Luftfeuchte; als Abkürzung für die relative Luftfeuchte verwendet
lfdm	Laufender Meter (bei Aktenbeständen im Regal)
LVR-AFZ	Landschaftsverband Rheinland – Archivberatungs- und Fortbildungszentrum
MC	Methylcellulose
MD	Machine Direction (Längsrichtung)
NATA	National Association of Testing Authorities
NBSK	Northern Bleached Sulfate Kraft (ein gebleichter Nadelholzzellstoff)
NCR	No Carbon Required (Selbstdurchschreibepapier ohne Kohlepapier)
NDA	Nuclear Decommissioning Authority
NEN	Nederlandse Norm
OCR	optical character recognition
ONR	Officer for Nuclear Regulation
pH	Pondus Hydrogenium
PVOH	Polyvinylalkohol
RMP	Refiner Mechanical Pulp
SVOC	Semi Volatile Organic Compounds
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TAPPI - cm	TAPPI – classical method
TAPP - sp	TAPPI – standard practice
TMP	Thermomechanical Pulp
UBA	Umweltbundesamt
ULB	Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UV	Ultraviolett
UZ	Umweltzeichen „Blauer Engel“
VOC	Volatile organic compound

Abkürzung:	Bezeichnung:
WAXS	Wide-angle X-ray scattering

9 Erläuterung einiger Fachbegriffe

Begriff:	Erläuterung:
Additiv	Ein Zugabestoff, mit dem bestimmte Eigenschaften eines Produktes erreicht werden sollen oder mit der der Produktionsprozess vereinfacht werden soll. Beispiele: → optische Aufheller, diese erhöhen den Weißgrad oder → Leimungsmittel, diese machen ein Papier mit Tinte beschreibbar.
Adhäsion	Die Anhangskraft zwischen zwei verschiedenen Medien, z. B. die Haftnotiz auf dem Schriftstück
Bleiche	Nach der Kochung von → Zellstoff ist noch ein Rest → Lignin in den Fasern enthalten. Dieser kann durch stark oxidierende Mittel wie Chlor, Chlordioxid, Sauerstoff, Ozon oder Peroxid entfernt werden, ein Vorgang, den man Bleiche nennt. Ein gebleichter Zellstoff hat üblicherweise niedrige → Kappazahlen und erscheint weiß, ein ungebleichter Zellstoff wirkt gelblich bis braun. Findet die Bleiche ohne reines Chlor, wohl aber mit chlorhaltigen Verbindungen statt, so nennt man den Zellstoff „elementarchlorfrei“ (ECF). Werden bei der Bleiche auch keine chlorhaltigen Verbindungen verwendet, so heißt der Zellstoff „total chlorfrei“ (TCF)
Cellulose	Cellulose ist zusammen mit → Hemicellulose und → Lignin ein Hauptbestandteil pflanzlicher Fasern. Chemisch ist Cellulose ein Polymer mit Glukose als Grundbaustein, ähnlich wie Stärke. Nur die räumliche Anordnung der Glukosebausteine unterscheidet Cellulose von Stärke. Cellulose ist das von der Natur am häufigsten produzierte Polymer. Gebleichter Zellstoff, aus dem weißes Papier hergestellt wird, besteht aus Cellulose und Hemicellulose, das Lignin wurde herausgelöst. So ein Papier wird → holzfrei genannt.
α-Cellulose	Im → Zellstoff ist → Cellulose zusammen mit Hemicellulose enthalten. Durch Natronlauge kann die Hemicellulose herausgelöst werden. Übrig bleibt die α-Cellulose, ein fast reine Cellulose, sehr ähnlich der Cellulose aus Baumwollfasern.
Carboxymethylcellulose	Dieser CMC abgekürzte Stoff ist, wie die → Methylcellulose, eine aus Cellulose hergestellte Etherverbindung, die im Gegensatz zur Cellulose wasserlöslich ist. Man findet sie als Verdickungsmittel oder Träger von Aromastoffen in Lebensmitteln (Zusatzstoff E466) sowie in Tabletten. Auch im Tapetenkleister wird sie verwendet. CMC findet sich sowohl als Additiv in der Streichfarberezeptur (wo es eine Binderfunktion und eine Trägerfunktion für optischen Aufheller haben kann) als auch als Hilfsmittel bei der Papierrestauration. Als natürlicher Leim kann sie zur Verfestigung bei Papierschäden eingesetzt werden.
Chlorbleiche	Siehe → Bleiche
Cobb-Wert	Ein Messwert, der Aufnahmefähigkeit eines Papiers gegenüber Flüssigkeiten angibt. Damit kann der Grad der → Leimung eines Papiers angegeben werden. Das zu untersuchende Papier wird gewogen und anschließend auf einer definierten Fläche über eine definierte Zeit bei definierter Flüssigkeitshöhe einer Testflüssigkeit ausgesetzt. Anschließend wird das Papier rückgewogen. Die Massenzunahme zeigt, wie viel Flüssigkeit das Papier pro Flächeneinheit in vorgegebener Zeit aufnehmen kann.
DIPN	Di-Iso-Propyl-Naphthalin; eine Chemikalie für → Selbstdurchschreibepapiere. Diese Substanz dient als Farbträger, der in einer Kapsel enthalten ist, die unter dem Druck einer Kugelschreibermine aufplatzt und mit einer Gegenschicht reagiert.

Begriff:	Erläuterung:
Glutin	Glutin ist das Eiweiß der Gelatine und Hauptbestandteil der tierischen Leime (Glutinleim). Es wird durch Auskochen von Tierknochen, -knorpel und -häuten und Fischgräten gewonnen.
EMP	Ein elektromagnetischer Impuls, abgekürzt EMP (engl. <u>e</u> lectromagnetic pulse), bezeichnet einen einmaligen kurzzeitigen, hochenergetischen, breitbandigen elektromagnetischen Ausgleichsvorgang. Es handelt sich dabei nicht um ein periodisches (pulsierendes) Ereignis, sondern um einen transienten Vorgang mit der wesentlichen Eigenschaft, in sehr kurzer Zeit auf einen bestimmten Maximalwert anzusteigen und dann vergleichsweise langsam auf den stationären Ruhewert abzufallen. Ursachen in leichter Form sind Blitze, in schwerer Form nukleare Explosionen oder Sonnenwinde, verursacht durch Sonnenflecken. Ein EMP kann elektrische Geräte zerstören und elektromagnetische Speicher löschen.
Farbort	Die Farbe eines Produktes kann durch 3 Farbmaßzahlen angegeben werden. Gebräuchlich ist das CIE-L*a*b*-System. Hier errechnen sich die drei Maßzahlen aus der reflektierten Lichtmenge bei Nutzung eines Rot-, Blau- und Gelbfilters. Es gibt verschiedene Farbmaßzahlen, z. B. bezeichnet L* die Helligkeit eines Produktes, a* die Koordinate der Farbe auf der rot-grün-Achse, b* die Koordinate auf der gelb-blau-Achse.
gestrichen	Als „gestrichen“ bezeichnet man ein Papier, welches einen Pigmentauftrag auf der Oberfläche erhalten hat, ähnlich dem Weiß-Streichen einer Tapete. Bevorzugte Pigmente hierbei sind Calciumcarbonat und →Kaolin sowie in manchen Fällen Titandioxid. Damit die Streichpigmente auf der Papieroberfläche haften und nicht nach dem Trocknen wieder abfallen, muss ein Bindemittel eingesetzt werden. Dies sind verschiedene Latices oder auch Pflanzenstärke. Es handelt sich beim Streichen um einen Veredelungsprozess, der an Papier für hochwertige Druckerzeugnisse (Magazine, Broschüren) angewendet wird. Ungestrichene Papiere heißen auch →Naturpapiere.
Hadern	Eine in Deutschland übliche Bezeichnung für → Cellulosefasern aus natürlichen Textilfasern wie Baumwolle (Linters), Leinen, Hanf, Flachs etc. Hadern sind durch einen sehr hohen Cellulosegehalt gekennzeichnet, → Hemicellulosen und → Lignin spielen keine Rolle. Hadern für Papiere, die beschrieben oder bedruckt werden müssen, dürfen nicht aus Textilabfällen gewonnen werden, da diese lichtecht gefärbte Fasern enthalten, die das Schriftbild stören.
Hemicellulose	Hemicellulose bildet zusammen mit → Cellulose und → Lignin den Hauptbestandteil pflanzlicher Fasern. Chemisch ist Hemicellulose ein Sammelbegriff für
Holzhaltig hh ⁴	Papier, in welchem → Holzstoff verwendet wurde
Holzfrei hf ⁴	Papier aus gebleichtem → Zellstoff, in dem maximal 5 % → Holzstoff enthalten sein darf
Holzstoff	Papierfasern aus Pflanzen, bei denen die Kitsubstanz → Lignin nicht entfernt wurde.
hydrophob	Einen Stoff, der Wasser abweist, nennt man hydrophob. Hydrophobe Stoffe lösen sich nicht in Wasser. Bei → Leimung wird Papier hydrophob gemacht (hydrophobisiert), damit es tintenbeschreibbar wird und wasserbasierte Farben nicht wie auf einem Löschblatt verlaufen.
Hysterese	Man spricht allgemein von Hysterese, wenn die durch eine Ursache hervorgerufene Wirkung verzögert eintritt. Die Feuchtigkeitshysterese bei Papier führt dazu, dass der sich einstellende Quellungszustand einer Faser davon abhängig ist, ob er durch Wasseraufnahme oder Wasserabgabe entstanden ist. Bei einer Temperatur von 23 °C und 50 % relativer

Begriff:	Erläuterung:
	Luftfeucht (Normklima für Papierprüfungen) ist einen Faser dicker, wenn sie aus feuchterem Klima ins Normklima akklimatisiert wurde als wenn sie aus trockenerem Klima kommt.
Kappazahl	Eine chemische Messmethode, die den Gehalt an oxidierbaren Stoffen in einem Fasergemisch ermittelt. Das Messergebnis wird wesentlich durch den Gehalt an → Lignin bestimmt, allerdings nicht ausschließlich. In einigen Normen wird die Kappazahl als Maßzahl für das Oxidationspotential bezeichnet und limitiert.
Kaolin	Hierbei handelt es sich um ein anorganisches Pigment, welches in Streichfarben für Papier verwendet wird. Kaolin ist mineralisch ein Aluminiumschichtsilikat, welches in einer sehr feinen Plättchenstruktur vorliegt. Dadurch erzeugt es (im Gegensatz zum preislich günstigeren Calciumcarbonat, welches als Streichpigment in kugelige Struktur vorliegt) eine glänzende Oberfläche. Für glänzende Papiere wird daher Kaolin zugesetzt, typischerweise etwa 20 % der Pigmentmasse, die andern 80 % bestehen aus Calciumcarbonat.
Kohäsion	Die Zusammenhangskraft innerhalb einer Körpers, z. B. die Kraft, mit der die einzelnen Fasern eines Papierblatte im Fasergefüge verankert sind.
Kolonie	Im Zusammenhang mit der Bestimmung der Verkeimung eines Papiers werden „Kolonien“ gezählt. Dabei handelt es sich um mikrobiologische Einheiten (Bakterien oder Pilze), die durch Vermehrung so große zusammenhängende „Kolonien“ bilden, dass sie makroskopisch als „Flecken“ sichtbar werden und gezählt werden können. Im Prinzip entspricht dies den Schimmelflecken, die man zu Beginn eines sichtbaren Schimmelbefalls oder dem Verderb eines Lebensmittels sehen kann. Wartet man zu lange, dann wachsen die einzelnen Kolonien zusammen zu einem großen Fleck und können nicht mehr gezählt werden.
Kupferzahl	Eine chemische Messmethode, die den Gehalt an oxidierbaren Stoffen in einem Fasergemisch ermittelt. Das Messergebnis wird wesentlich durch den Gehalt an → Lignin bestimmt, allerdings nicht ausschließlich. Die Kupferzahl wurde im Laufe der Zeit durch die modernere → Kappazahl ersetzt.
Leimung	Ein etwas irreführender Fachbegriff, denn hier wird nichts verklebt, sondern die poröse Papierstruktur wird chemisch mit einem „Leimungsmittel“ so behandelt, das Tinten und Druckfarben nicht verlaufen. Ein ungeleimtes Papier wäre ein Löschblatt, auf dem die mit Füller geschriebene Schrift verläuft. Leimungsmittel wie Harze, Stärke oder Gelatine verändern die Porenstruktur und die Benetzbarkeit so, dass das Papier zwar Tinte und Druckfarbe aufnehmen kann, aber in gewünschter Menge. Eine Möglichkeit, dies messtechnisch zu beschreiben, ist der → Cobb-Wert
Lignin	Eine braune organische Substanz, die als Kitsubstanz zwischen den Fasern eines Baumes dient und Bestandteil pflanzlicher Fasern ist. Es handelt sich um eine Gruppe von phenolischen Makromolekülen, welche nicht nur aus einem Monomer aufgebaut sind.
Methylcellulose	Methylcellulose (abgekürzt MC) ist ein in Speisen und technischen Anwendungen eingesetztes Verdickungsmittel (Zusatzstoff E461). Es wird aus Cellulose gewonnen und ist chemisch eine Ethernverbindung. Wegen der Ähnlichkeit des Moleküls zur Cellulose kann es sich gut an die Cellulose von Papierfasern anlagern und diese festigen. Es wird daher in der Papierrestauration, ähnlich wie → Carboxymethylcellulose, eingesetzt. Im Haushalt findet es auch als Kleister Verwendung.

Begriff:	Erläuterung:
Naturpapier	Dies ist eine Bezeichnung für ungestrichene Papiere, z. B. Zeitungsdruckpapier oder Kopierpapier (siehe auch →gestrichen).
OCR-Verfahren	OCR steht für „optical character recognition“ und bezeichnet einen Begriff aus der Informationstechnik. Aus graphischen Zeichen wird mithilfe von Algorithmen ein Text erkannt und die Graphik in einen Text umgewandelt. Das Verfahren lässt sich nutzen, um Dokumente, auch berührungslos, zu scannen und so zu duplizieren bzw. zu reproduzieren.
Opt. Aufheller	Ein → Additiv, das in der Lage ist, unsichtbares UV-Licht in sichtbares Licht im Blaubereich umzuwandeln. Dadurch erscheinen weiße Produkte noch weißer (Disco-Effekt der Schwarzlampen an weißen Kleidungsstücken). Optische Aufheller zersetzen sich mit der Zeit und führen dadurch zu einer Vergilbung des Produktes.
Papier	Papier ist in der DIN 6730 definiert. Es bezeichnet ein vorwiegend aus Fasern pflanzlicher Herkunft hergestelltes flächiges Gebilde, das durch Aufgießen einer Suspension auf ein Sieb entstanden ist.
Pergaminpapier	Gemäß DIN 6730 ist Pergamin ein → <i>hochsatinirtes</i> , aus stark gemahlenem Zellstoff mit oder ohne Zusatz von Hilfsmitteln hergestelltes, weitgehend fettgedichtetes Papier, im Allgemeinen mit hoher Transparenz — soweit nicht gefärbt oder opak. Es ist dem Pergamentersatzpapier sehr ähnlich, welches holzfreies Papier ist, das durch entsprechende Mahlung und/oder Zusatz von Hilfsmitteln zum Faserstoff und/oder durch Behandlung in der Papiermaschine bezüglich der Fettdichte ähnliche Eigenschaften wie „echt Pergament“ erhalten hat.
Polyvinylalkohol	Abgekürzt PVOH; diese Substanz findet sich als Additiv in Papierstreichfarben. Sie hat eine Binderwirkung, unterstützt die ebenfalls als Binder eingesetzte Stärke und dient als Trägermaterial für optischen Aufheller, der so in der Streichfarbe verbleiben kann. Die Funktion von PVOH ist ähnlich der → Carboxymethylcellulose, jedoch wird PVOH nicht aus einem Naturstoff gewonnen. In Lebensmitteln findet es sich als Zusatz mit der Nummer E 1203 vor allem in Kunstdärmen. Auch in der Pharmaindustrie wird es als Überzug eingesetzt.
satinirt	Satinage ist ein in der Papier- und Textilindustrie übliches Verfahren, mit dem durch Druck und Hitze eine glänzende Oberfläche erzielt werden soll. Das Verfahren ist technologisch dem haushaltsüblichen Bügeln verwandt.
Selbstdurchschreibepapier	Diese auch als NCR-Papiere (no carbon required) bezeichnete Sorte enthält in kleinen, aufgestrichenen Kapseln Di-Iso-Propyl-Naphtalin (→ DIPN). Die Substanz dient als Farbträger, der in einer Kapsel enthalten ist, die unter dem Druck z. B. einer Kugelschreibermine aufplatzt und mit einer Gegenschicht reagiert. Meist wird dieses Papier in Quittungen oder Frachtpapieren verwendet, bei denen mehrere Durchschläge gleichzeitig, oft farblich unterschieden, hergestellt werden können. Derartige Papiere verblassen sehr leicht.
Slurry	Fachbegriff für die Aufschlämmung von anorganischen Streichpigmenten in Wasser.
Störstoff	Allgemeiner Begriff für Moleküle oder Agglomerationen, die den Papierherstellungs- oder Druckprozess in irgendeiner Weise stören. Zur Bekämpfung können Störstoffe gezielt ausgeschleust, maskiert (d. h. von unschädlichen Materialien umhüllt) oder fixiert (d. h. an einer Stelle, an der sie keine störende Wirkung entfalten können, gezielt angebonden) werden.
Thermopapier	Diese Sorte ist mit Kapseln gestrichen, die eine Farbe enthalten. Bei Hitze zersetzen sich die Kapseln und geben die Farbe frei. Anwendung

Begriff:	Erläuterung:
	finden derartige Papieren in alten Farbdruckern (um 1990), in Kassenzetteln, Preisetiketten und Bankauszügen. Letztere werden mit der farbbeständigsten Qualität hergestellt, die aber nur eine Lesbarkeitszeitraum von 12 Jahren garantieren muss. Einfache Qualitäten sind oft innerhalb eines Jahres nicht mehr lesbar (Tankquittung).
Tissue	Nach VDP-Einteilung eine der vier Hauptgruppen von Papier. Es handelt sich hierbei um Toilettenpapier, Papiertaschentücher, Papierhandtüchern, Servietten, Kosmetiktüchern, Papierauflagen Im Wellness- oder Medizinbereich und ähnliches.
Vergilbung	Wenn Papier dem Tageslicht, insbesondere UV-Strahlung, ausgesetzt wird, dann ändert sich seine Farbe ins Gelblich/Bräunliche. Diesen Vorgang nennt man Vergilbung. Es gibt zwei wesentliche Ursachen. Am stärksten ist Vergilbung an Papieren zu beobachten, die → Lignin enthalten. Hier wird durch Lichteinwirkung das Ligninmolekül so verändert, dass es gelblich wird. Dies betrifft die → holzhaltigen Papiere, z. B. Recyclingpapier. Die → holzfreien Papiere sind oft mit → optischem Aufheller versetzt. Dieser zersetzt sich durch UV-Strahlung mit der Zeit, wodurch der Blauwert des Papiers abnimmt, was komplementär eine Zunahme des Gelbwertes bedeutet.
Weißgrad	Ein optischer Parameter zur Beurteilung der Weiße von Papier oder Zellstoff. Licht einer bekannten Strahlungsquelle wird von der Probe reflektiert und bei einer Schwerpunktwellenlänge von 452 nm gemessen. Wird das Licht komplett reflektiert, ergibt sich eine Weiße/Weißgrad von 100 (= 100 %). Durch → Vergilbung sinkt der Weißgrad. Es gibt auch Weißgrade über 100, dies kommt durch → optische Aufheller zustande, die unsichtbares UV-Licht in sichtbares Licht umwandeln. An farbigem Papier wird statt der Weiße der → Farbort gemessen.
Zellstoff	Ein Faserstoff, bei dem das → Lignin durch einen chemischen Kochprozess weitestgehend entfernt wurde. Durch eine → Bleiche wird das Lignin fast vollständige entfernt.
Zero Span	= Nullreißlänge; bei diesem Messverfahren wird ein Streifen Papier nur mit 0,7 mm Einspannlänge eingespannt und dann zerrissen. Dadurch misst man im Wesentlichen die Festigkeiten der Einzelfasern, nicht so sehr die Festigkeit des Fasergefüges

10 Anlagen

Verwendete Schlagworte bei der Literaturrecherche (z. T. miteinander kombiniert):

Deutsch: Abbau Cellulose (Zellulose), AKD (Alkylketendimer), Alterung Papier, alterungsbeständig, Aluminiumsulfat, Alaun, Ausgasen, Aushärtung, Archivalien, ASA (Bernsteinsäureanhydrid), Baumwolle, Baumwollgewebe, beschichtetes Papier, Calciumcarbonat, chemische Papierprüfung, DIN-Norm, Dokument, Entsäuerung, Farbausbluten, Farbechtheit, Haltbarkeit Papier/Pappe/Karton, Hitzebeständigkeit, holzhaltig, ISO-Norm, Klebeeigenschaft, Klebstoff, Kolophonium, Konservierung, Lichtecht, Lignin, Linters, Neutralleimung, optischer Aufheller, Papierzerfall, pH-Wert, Polymerisation, Reifung, Restaurierung, Schädlingsbefall, tierischer Leim, Vergilbung, Vergilbungsneigung, Vliesstoff, Zerfall

Englisch: ageing (aging), accelerated ageing, archive, bleeding, curing, deacidification, durability, enduring value, ink-jet, longevity, permanence, printing papers, recycled fibre (fiber), rosin sized, stability, weathering

Französisch: AFNOR, dégradation, détérioration, durabilité, intégrité, intangibilité, pâte chimique, pâte mécanique, stabilité, vieillissement

