

Abschlussbericht

Einsatz von green solvents zur Festigung von vegetabil gegerbtem Leder mit Aerosolen
(DBU-Az.: 39244/01-45)

Verfasser

Prof. Dr. Andrea Pataki-Hundt, Dr. des. Marlen Börngen M.A., Maike Linden, M.A.

Antragsteller

Technische Hochschule Köln (TH Köln)
Cologne Institute of Conservation Sciences (CICS)
Ubierring 40
50678 Köln

Kooperierende Partner

BELO Restaurierungsgeräte GmbH
Wiesenstraße 14
79585 Steinen

Projektlaufzeit: 01.04.2024 – 30.04.2026

Köln, Juli 2026

Zusammenfassung	3
1. Anlass und Zielsetzung des Projekts.....	3
2. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden	6
2.1 Literaturrecherche und Auswahl der green solvents	6
2.2 Vorauswahl und Löslichkeitstests.....	7
2.3 Befragung von Restaurator*innen	8
2.4 Probenherstellung und Auswertung.....	9
2.5 Konsolidierungslösungen.....	13
3. Auswertung	14
4. Entwicklung und Testen der Aerosolkammer	17
5. Praxistests an Originalobjekten.....	19
6. Projektergebnisse	20
7. Diskussion	22
8. Öffentlichkeitsarbeit und Resonanz	23
9. Fazit und Ausblick	26
10. Literaturangaben	27
11. Abbildungsverzeichnis	29
12. Tabellenverzeichnis.....	29
13. Abbildungs- und Tabellennachweis.....	29

Zusammenfassung

Green solvents sind in den Konservierungswissenschaften ein noch wenig erforschtes Gebiet. Im Rahmen des DBU-Projekts „Green solvents zur Festigung von vegetabil gegerbtem Leder mit Aerosolen“ wurde eine Auswahl an green solvents im konservierungswissenschaftlichen Kontext herausgearbeitet. Zudem wurde die Vernebelbarkeit von Konsolidierungslösungen mit Druckluft eruiert und auf Probekörpern aus Leder getestet, bevor sie auf originale Bände überführt wurde.

Die drei green solvents Dowanol PM, Ethyllactat und 3-Methoxy-3-methyl-1-butanol (MMB), gelöst in Klucel® G, wurden als sehr gut eingestuft. Hier sticht besonders Dowanol PM heraus, und Lösungen in Konzentrationen von 0,5 % erfüllen die Parameter einer gelungenen Festigung. Dazu zählen eine gute Vernebelbarkeit, ein gleichmäßiger Gas-Partikel-Strom, keine oder wenig Verfärbung des Leders, eine gute Festigungsleistung, gute Penetration und geringe Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit. Die Auswertung wurde mit Hilfe der Micro-Hot-Table-Methode, der Differentialkalorimetrie (DSC), einem Abklatschtest, der Multiphotonenmikroskopie und der 3D- Profilometrie durchgeführt. Das kleine mittelständische Unternehmen (KMU) produzierte eine Aerosolkammer als Prototyp und lieferte wichtige Hinweise zur Konstruktion und Durchführung. Die Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf (ULB) und die Staatsbibliothek zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, steuerten originale historische Bücher mit dem avisierten Schadensbild bei, die erfolgreich gefestigt werden konnten.

1. Anlass und Zielsetzung des Projekts

Das Schadensphänomen „roter Zerfall“ betrifft Bibliotheksbestände aus dem 19. Jahrhundert in nationalen und internationalen Bibliotheken. Roter Zerfall tritt typischerweise bei vegetabil gegerbten Ledern auf, die mit kondensierten Gerbstoffen gegerbt wurden. Extrinsische Faktoren, die während der Industrialisierung aufkamen – wie die Gasbeleuchtung und die damit verbundene längere Exposition gegenüber schädlichem Licht und schwefeloxidhaltigen Abgasen – haben in Kombination mit der minderwertigen Lederqualität dieser Zeit das Schadensbild zusätzlich beschleunigt. Schwefeldioxid aus der Luft wird vom Leder absorbiert, was zu einer erhöhten Säurebelastung führt und einen Abbau der Kollagenfasern durch saure Hydrolyse bewirkt. Externe Einflüsse wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Licht beschleunigen diesen Degradationsprozess zusätzlich. Die betroffenen Bücher pudern stark ab, und die Lederfasern lösen sich aus ihrem Verbund, was zu einer erheblichen mechanischen Schwächung führt. Die Auswirkungen des roten Zerfalls sind irreversibel (siehe Abbildung 1).

Objekte mit rotem Zerfall sind in ihrer Benutzbarkeit stark eingeschränkt: Materialverlust kann auftreten, das Öffnen eines Buches wird erschwert und die Kontaktkontamination erhöht sich. Obwohl Bibliotheksgut heute in großem Maßstab massenentsäuert wird, um den Verfall papierbasierter Bestände zu verlangsamen, sind Lederbände von diesen Verfahren ausgenommen: Die marktführenden nichtwässrigen Verfahren wurden für Papier entwickelt und sind nicht auf proteinhaltige Materialien wie Leder übertragbar. Eine Exposition gegenüber den eingesetzten Entsäuerungslösungen führt bei abgebautem Leder zu irreversiblen Strukturveränderungen. Diese Bestände können daher nur mit Einschränkung massenentsäuert, katalogisiert und digitalisiert werden und entziehen sich dadurch der wissenschaftlichen Nutzung und Bearbeitung.

Zur Wiederherstellung der Benutzbarkeit von Objekten mit rotem Zerfall muss das Leder gefestigt werden. Eine Konsolidierungslösung besteht aus einem Bindemittel – häufig Hydroxypropylcellulose (Klucel®) – und einem Lösungsmittel. Sie soll das Leder vollständig durchdringen, ohne es zu versteifen, und darf die visuellen Eigenschaften des Leders nicht beeinträchtigen. Die eingesetzten Materialien müssen chemisch stabil und objektverträglich sein. Für die Festigung von rotem Zerfall existiert bislang lediglich eine Einzelobjektlösung: das manuelle Aufbringen von Klucel® gelöst in Butanol oder Ethanol (Pataki, Pesch, Börngen 2022). Dieses Verfahren ist für große Bibliotheksbestände jedoch unrealistisch. Erschwerend kommt hinzu, dass der extrem niedrige pH-Wert des abgebauten Leders (ca. pH 2–3) die Verwendung wässriger Medien und niedermolekularer Alkohole ausschließt: Der Kontakt führt zu einem sofortigen, irreversiblen Verschwärzen des Leders (siehe Abbildung 2). Als mögliche Lösungsmittel kommen neben Butanol unter anderem 1-Pentanol, Aceton und Toluol in Frage. Doch haben alle bislang eingesetzten Lösungsmittel den Nachteil, gesundheits- und umweltschädlich zu sein – sie können Haut- und Augenreizungen verursachen sowie zur Wasserverschmutzung beitragen. Zudem sind klassisch eingesetzte Lösungsmittel wie Ethanol und Butanol leicht entflammbar, toxisch und leicht flüchtig, was den Bedarf an sichereren Alternativen unterstreicht.



Abbildung 1 Buch mit rotem Zerfall, zu erkennen an der roten pudrigen Oberfläche

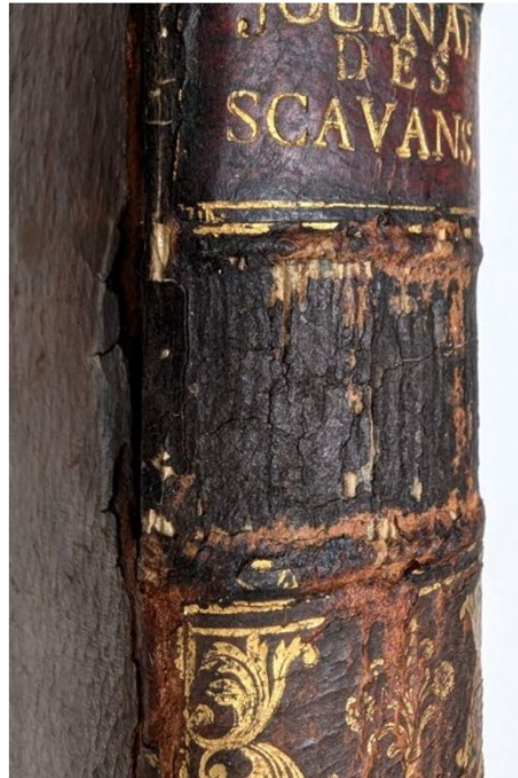


Abbildung 2 Verschwärztes Leder durch den Kontakt mit Wasser verursacht.

Ausgangspunkt des Vorhabens war die Suche nach einer umwelt- und gesundheitsverträglicheren Alternative zum bislang eingesetzten Butanol für die Festigung von rotem Zerfall.

Das Projekt zielte deshalb darauf, geeignete green solvents zu identifizieren, ihre Eignung in Kombination mit Klucel© zu prüfen und eine geeignete Applikationstechnik für den Einsatz an Büchern zu entwickeln. Als vielversprechender Ansatz wurde dabei das berührungsfreie Vernebeln von Konsolidierungslösungen mittels Aerosole in geschlossenen Kammern aus inerten Materialien im Kreislaufsystem verfolgt. Dabei sollte eine überschüssige Applikation vermieden werden, um die eingesetzten Materialien und Lösungsmittel möglichst effizient zu nutzen. Für die Entwicklung und Erprobung der Methode mussten zudem Proben hergestellt werden, die das Schadensbild des roten Zerfalls imitieren.

Daraus ergaben sich drei zentrale Projektziele: die Auswahl eines geeigneten green solvents, die Entwicklung einer anwendungsorientierten Aerosolkammer sowie die Erprobung der Methode an Probekörpern und Originalobjekten. Ergänzend wurden das Abhalten eines Workshops sowie die Publikation der Ergebnisse in einem peer-reviewten Journal als Kernziele definiert. Über den Projektfortschritt wurde die DBU in regelmäßigen Zwischenberichten informiert.

Aufgrund von Verzögerungen wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um sieben Monate beantragt, welche gewährt wurde. Daraus ergibt sich eine Gesamtlaufzeit des Projekts vom 01. April 2024 bis zum 30. April 2026.

2. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Projekt wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiterinnen eingestellt, die das Projekt zusammen mit der Projektleitung durchführten. Diese waren Frau Dr. des. Marlen Börngen, M.A. und Frau Maike Linden, M.A. Zusätzlich wurden drei studentische Hilfskräfte zur Unterstützung mit unterschiedlichen Laufzeiten eingestellt. Mit dieser Personaldecke wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt.

2.1 Literaturrecherche und Auswahl der green solvents

Zu Beginn des Projekts wurden green solvents recherchiert, die sich für das Lösen von Klucel© eignen, bei Spotttests auf Leder keine unerwünschten Verdunklungen verursachen und auch möglichst nachhaltig sind (Alder, Hayler, Henderson et al. 2016). Die Auswahl der Lösungsmittel basierte auf Wypych und Wypych (2019) „Databook of Green solvents“ sowie den zwölf Prinzipien der grünen Chemie nach Anastas und Warner (1998) und auf den Arbeiten von Prat, Wells, Hayler et al. 2016. Die zwölf Prinzipien¹ – darunter Abfallvermeidung, Sicherheit und biologische Abbaubarkeit – zielen darauf ab, die Umweltauswirkungen chemischer Produkte und Prozesse zu minimieren.

Bei der Auswahl der Lösungsmittel wurden folgende Kriterien herangezogen, die für eine hohe Umweltentlastung sprechen:

- Hohe biologische Abbaubarkeit
- Hohe Anteile an nachwachsenden Rohstoffen
- Geringer Dampfdruck (für bessere Penetration des Leders)
- Sicherheit für die Anwender*innen
- Geeignete Verdunstungszeit
- Hohe Ausbeute an Aerosolen

¹ Die zwölf Prinzipien: Limit accident potential, waste prevention, atom economy, less hazardous synthetis, safer chemicals, safer solvents/auxiliaris, energy efficiency, renewable feedstock, reduce derivates, catalysis, design degradation, real-time analysis (Anastas, Warner 1998).

2.2 Vorauswahl und Löslichkeitstests

In einem ersten Schritt wurden verschiedene green solvents zur Herstellung von Klucel®-Lösungen getestet (siehe Tabelle 1). Einige Lösungsmittel wurden bereits in dieser Phase eliminiert, da Klucel® nur angequollen wurde, sich aber nicht vollständig löste. Die grün unterlegten Lösungsmittel in Tabelle 1 zeigten schon recht gute Ergebnisse. In einem weiteren Schritt wurden Spotttests auf künstlich gealtertem Leder durchgeführt, um Verfärbungen zu erkennen und die Verdunstungszeit zu prüfen. Lösungsmittel, die Verdunklungen verursachten oder mehrere Stunden zur vollständigen Verdunstung benötigten, wurden ebenfalls aussortiert.

Tabelle 1 Auswahl an green solvents, die im Rahmen des Projekts untersucht wurden.

Lösungsmittel	Struktur Formel	Dampfdruck (hPa)
N-Butyl-2-pyrrolidon	C ₈ H ₁₅ NO	0.13 (25°C)
3-Methoxy-3-methyl-1-butanol	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.47 (20°C)
1-Pentanol	C ₅ H ₁₂ O	1.3 (20°C)
Ethyl lactate	C ₅ H ₁₀ O ₃	2.0 (20°C); 5.0 (25°C)
Dowanol PM	C ₄ H ₁₀ O ₂	15.6 (25°C)
Propylene carbonate	C ₄ H ₆ O ₃	0.04 (20°C)
Dibasic ester	C ₂₁ H ₃₆ O ₁₂	0.094 (25°C)
2-Ethylhexylaldehyde	C ₁₇ H ₃₆ O ₂	0.003 (20°C)
Diethyl adipate	C ₈ H ₁₄ O ₄	0.0284 (21°C)
Dimethyl glutarat	C ₇ H ₁₂ O ₄	0.083 (20°C)
Dimethyl succinate	C ₆ H ₁₀ O ₄	0.235 (25°C)
Methylphenylether	C ₇ H ₈ O	4.7 (25°C)
Diethyl carbonate	C ₅ H ₁₀ O ₃	14 (25°C)
Dimethylcarbonate	C ₃ H ₆ O ₃	24 (21.1°C)

Auf dieser Grundlage wurden drei green solvents für die nachfolgenden Konsolidierungsversuche ausgewählt: Ethyllactat (Milchsäureethylester), Dowanol PM (1-Methoxy-2-propanol) und 3-Methoxy-3-methyl-1-butanol (MMB). Es wurde zusätzlich 1-Pentanol getestet, obwohl es nicht als reines green solvent gilt, aber Erfahrungswerte aus vorangegangenen Projekten und der Praxis bestanden und dieses Lösungsmittel zu guten Festigungsergebnissen führt.

Ethyllactat (auch als Milchsäureethylester und 2-Hydroxypropionsäureethylester bezeichnet) gilt als green solvent, da es zu 100 % biologisch abbaubar ist und aus nachwachsenden Rohstoffen (Mais) hergestellt wird. Es weist zudem eine geringere Entflammbarkeit als Ethanol auf und gewinnt in der Pharmazie, Lebensmittel- und Kosmetikbranche stetig an Bedeutung. Die Produktion erfolgt ohne toxische Nebenprodukte. Der Dampfdruck liegt bei 2,67 hPa.

Dowanol PM erfüllt ebenfalls mehrere der 12 Prinzipien. Es ist leicht biologisch abbaubar, die Herstellung ist hochselektiv und erzeugt nahezu keine Nebenprodukte. Zudem werden Katalysatoren verwendet, die wiederverwendet werden können. Dowanol PM hat einen Dampfdruck von 15,6 hPa.

3-Methoxy-3-methyl-1-butanol (MMB) wird ebenfalls unter Verwendung von Katalysatoren in einem einstufigen Verfahren hergestellt, wobei kaum Nebenprodukte entstehen. Das Lösungsmittel gilt als nicht toxisch und nicht wassergefährdend. Mit einem Dampfdruck von 0,47 hPa besitzt MMB den niedrigsten Dampfdruck der ausgewählten Lösungsmittel.

1-Pentanol ist entzündbar und reizt Haut und Atemwege. Der Dampfdruck beträgt 2,6 hPa.

Ein zentrales methodisches Erkenntnisinteresse der Literaturarbeit war die Frage, ob der Dampfdruck der Lösungsmittel – und nicht allein das Molekulargewicht oder die Polarität – das entscheidende Kriterium einer erfolgreichen Anwendung auf rotem Zerfall darstellt. Ein niedriger Dampfdruck bedeutet, dass das Lösungsmittel langsamer verdunstet und somit besser in das Leder eindringen kann. Dies gewährleistet eine vollständige Konsolidierung und nicht nur eine oberflächliche Festigung.

2.3 Befragung von Restaurator*innen

Zur Erfassung des Praxisstands wurden gezielt Restaurator*innen aus dem In- und Ausland kontaktiert – darunter Fachleute nicht nur aus der Papierrestaurierung, sondern auch aus angrenzenden restauratorischen Disziplinen. Ziel der Umfrage war es, praxisrelevante Bedarfe frühzeitig zu identifizieren und in das Projekt einfließen zu lassen. Die Ergebnisse zeigten, dass etwa die Hälfte der Befragten bislang keine green solvents einsetzt, rund ein Drittel bereits Erfahrungen mit Dowanol PM gesammelt hat und Ethyllactat noch vergleichsweise wenig verbreitet ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein vertiefendes Interview mit Dr. Ingrid Stelzner vom Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA), Mainz, geführt. Sie berichtete, dass Dowanol PM bereits zur Festigung archäologischen Leders genutzt wird – allerdings in Kombination mit Paraloid B72 anstatt mit Klucel© und in deutlich höherer Konzentration.

Die Umfrage verdeutlichte insgesamt, dass green solvents in der Restaurierungspraxis noch wenig verbreitet sind. Die zurückhaltende Anwendung ist vermutlich auf mangelnde Kenntnisse und fehlende praktische Erfahrungen mit diesen Mitteln zurückzuführen. Dies spiegelt den bereits im Antrag beschriebenen Befund wider, dass das Forschungsgebiet der Buch- und Papierrestaurierung traditionell eher konservativ ist, was den Einsatz neuer Materialien und Lösungsmittel betrifft – und dass eine Tendenz zu green solvents in diesem Bereich bislang kaum zu erkennen ist. Hier besteht ein klarer Bedarf an gezielter Wissensvermittlung und praxisnahen Anwendungsbeispielen, den das vorliegende Projekt adressieren möchte.

2.4 Probenherstellung und Auswertung

Für die Versuche wurden Probekörper aus künstlich gealtertem sowie historisch natürlich gealtertem Leder hergestellt. Als Ausgangsmaterial diente vegetabil gegerbtes Kalbsleder mit kondensierten Gerbstoffen von Anton Glaser, Stuttgart. Die Alterung erfolgte in Anlehnung an die Untersuchungen von Larsen et al. (2017) und wurde an die verfügbaren Gerätschaften angepasst: Zunächst wurde das Leder 96 Stunden bei 120 °C vorgealtert, was zu einer sichtbaren Dunkelfärbung führte. Anschließend folgte eine Klimaalterung über 20 Tage bei 50 °C und 75 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Um den Grad der künstlichen Alterung zu beurteilen, wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Die Schrumpfungstemperatur – ein Maß für die physikalische Stabilität des Leders – wurde sowohl mittels der Micro-Hot-Table- Methode (MHT) als auch mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) bestimmt (Carsote, Badea 2019). Beide Methoden wurden komplementär eingesetzt, da die MHT eine direkte visuelle Beobachtung des Schrumpfungsverhaltens auf Faserebene ermöglicht, während die DSC zusätzlich quantitative thermodynamische Parameter liefert, die eine umfassendere Beurteilung der hydrothermalen Stabilität des Kollagens erlauben.

Bei der MHT Methode wurden etwa 8 Fasern auf einen Objektträger mit Mulde in dem. Wasser eingeweicht, das Deckgläschen mit Fixogum verschlossen und von Raumtemperatur bis zur Schrumpftemperatur um 2° min⁻¹ erhitzt (LAB Heiztisch).

Die DSC-Messungen erfolgten mit einem Netzsch Sirius 3500-Kalorimeter im Temperaturbereich von 11 bis 95 °C bei einer Aufheizrate von 10 K/min. Proben von 5,0–10,0 mg wurden in demineralisiertem Wasser in konkaven Aluminiumtiegeln angesetzt und vor der Messung mindestens eine Stunde lang im Kühlschrank gelagert. Die experimentellen DSC-Daten wurden mit der Software Proteus 7 erfasst, um die

kalorimetrischen Kurven zu erhalten. Die Denaturierungstemperatur T_{max} wurde als die Temperatur definiert, die am Peakmaximum erreicht wird. Der Temperaturbereich des Übergangs wurde als Peakbreite auf halber Höhe ($\Delta T_{1/2}$) angegeben. Bei historischem Leder auftretende Mehrfachpeaks in der DSC-Kurve wurden mithilfe der „Onset“- und Peak-Suchfunktion dekonvoluiert. Das DSC-Gerät registriert die Wärmezufuhr rate, die erforderlich ist, um beide Aluminiumtiegel auf der gleichen Temperatur zu halten. Wenn die Lederprobe einen endothermen Prozess durchläuft, steigt der zur Aufrechterhaltung der Temperatur benötigte Energieaufwand, und auf der ansteigenden Temperaturkurve erscheint ein Signal (Chahine 2000).

Beide Methoden zeigten, dass die Schrumpfungstemperatur durch die Alterung deutlich gesunken ist (siehe Tabelle 2), was auf eine verringerte Stabilität der Lederfasern hindeutet. Der pH-Wert des Leders sank durch die Alterung von pH 6,0 auf pH 4,8.

Tabelle 2 Die Schrumpfungstemperatur von ungealtertem und gealtertem Leder, gemessen mit der Micro-Hot-Table-Methode (MHT) und der Differential Scanning Calorimetry (DSC).

Leder	MHT	DSC
Ungealtert	93.1°C	93.3°C
gealtert	57.8°C	64.0°C

Ergänzend dazu wurden Multiphotonenmikroskopie-Aufnahmen (MPM) angefertigt, die eine Abnahme des SHG-Signals bei gleichzeitiger Zunahme der Fluoreszenz zeigten (siehe Abbildung 3) – ein Hinweis auf den beginnenden Kollagenabbau (Schmeltz, Robinet, Heu-Thao et al. 2021). Das historische und künstlich gealterte sowie das neue Leder wurden ebenfalls mit der Multiphotonenmikroskopie untersucht. Die Messungen erfolgten mit einem Stellaris Dive-Mikroskop von Leica, das mit einem femtosekunden Ti:Sa-Laser von Coherent ausgestattet war (Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Paris, Dr. Laurianne Robinet). Für die berührungsfreie Messmethode wurde ein 10x-Luftobjektiv mit einer Anregungswellenlänge von 860 nm verwendet. Fluoreszenz- und SHG-Signale wurden gleichzeitig in Rückwärtsrichtung mit Hybriddetektoren erfasst. Die beiden Signale wurden jeweils in Falschfarben dargestellt – Rot für Fluoreszenz und Grün für SHG – mit optimiertem Kontrast. Nur ausgewählte Proben wurden mit Multiphotonenmikroskopie untersucht, da diese Methode sehr aufwändig ist.

Die Untersuchung diente auch dazu, zu prüfen, ob sich die Faserstruktur durch die Konsolidierung verändert. Zudem sollte die Verteilung von Klucel© im Leder visualisiert werden.

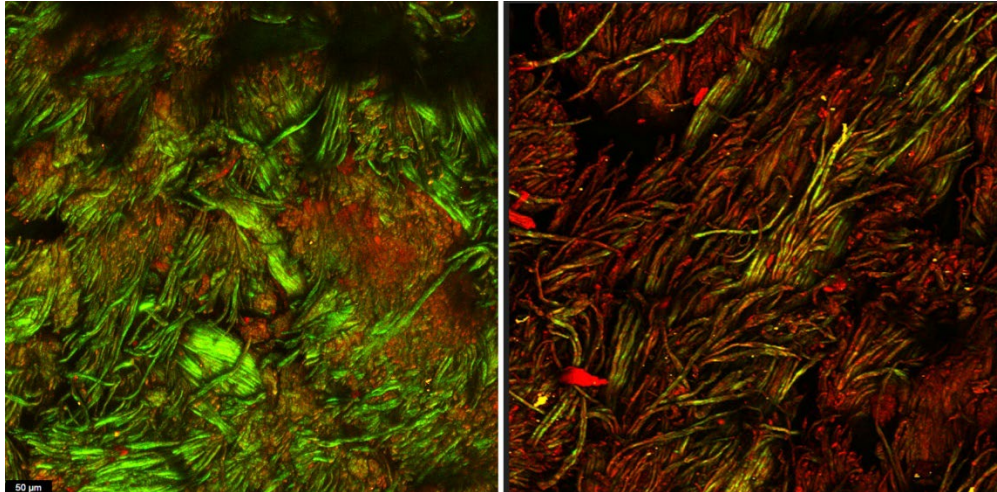


Abbildung 3 Multiphotonenmikroskopie von ungealtertem Leder (links) und gealtertem Leder (rechts).

Die thermische und klimatische künstliche Alterung erwirkte einen messbaren chemischen Abbau, jedoch nur eine geringe oberflächliche Veränderung. Die mechanische Stabilität des gealterten Leders war noch vergleichsweise hoch: Das Material war nicht pudrend und unter dem Mikroskop waren kaum Veränderungen in der Faserstruktur erkennbar. Das Schadensbild des roten Zerfalls konnte durch die thermische künstliche Alterung allein daher nicht vollständig nachgebildet werden.

Um die starke Faserdegradation des roten Zerfalls zu imitieren, wurde das gealterte Leder anschließend mit einer Reibe zu Fasern zerrieben. Eine definierte Fasermenge von 2,8 g wurde in einer Silikon-Eiswürfelform zu einem Probekörper gepresst (siehe Abbildungen 4- 7). Um eine Beschädigung beim Entformen zu vermeiden, wurden die Fasern zwischen zwei Gipskörpern mit einem Gewicht von 96,4 g gepresst. Die so entstandenen fragilen Probekörper messen ca. $2,5 \times 2,5 \times 0,3$ cm (H $\times$ B $\times$ T) und weisen eine nur schwach gebundene Faserstruktur auf. Die pulvrige Textur des roten Zerfalls wird zwar nicht vollständig erreicht, die Probekörper bieten jedoch eine gute Grundlage für den Vergleich verschiedener Lösungsmittel.



Abbildung 4 oben: ungealtertes Leder, unten: gealtertes Leder nach Hitze- und Klimaalterung.



Abbildung 5 Zerreiben des gealterten Leders zu Fasern.



Abbildung 6 Pressen der Probekörper.



Abbildung 7 Fertig präparierte Proben

2.5 Konsolidierungslösungen

Klucel® wird häufig als Bindemittel bei der Konsolidierung von Leder mit rotem Zerfall eingesetzt. Es handelt sich um einen Celluloseether – genauer um Hydroxypropylcellulose. Charakteristisch für Klucel® sind seine Löslichkeit in Wasser und organischen Lösungsmitteln sowie seine Fähigkeit, flexible Filme zu bilden. Die verschiedenen Viskositätsklassen werden durch einen nachgestellten Buchstaben nach der Bezeichnung Klucel® gekennzeichnet (Hercules Incorporated 2001).

Für die Testreihe wurden basierend auf den Untersuchungen von Schatz (2024) Klucel® G und E ausgewählt. Die beiden Celluloseether unterscheiden sich in ihrem molekularen Gewicht und damit in ihrer Viskosität:

Klucel® G weist ein Molekulargewicht von 370.000 kg/mol auf, Klucel® E hingegen von 80.000 kg/mol (Schatz 2024; Hercules Incorporated 2001). Vorversuche (Pataki-Hundt et al. 2021) zeigten, dass bei 1 % Klucel® G-Lösung in Ethanol und Butanol nach 9-tägiger Wärmealterung bei 110 °C eine Vergilbung auftrat, nicht jedoch bei 90 °C. Eine anschließende Lichtalterung hatte keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse. Daher wurden Filmbildungsproben aus Klucel® G in folgenden Lösungsmitteln hergestellt: Dowanol PM, 3-Methoxy-3-methyl-1-butanol (MMB) und Ethyllactat in einer Konzentration von 1 % (w/v). Die Lösungen wurden in Polystyrol-Petrischalen (Pataki, Hummert 2016) gegossen und zur Filmbildung eingedampft. Die so hergestellten Filmproben wurden anschließend 4 Tage bei 90 °C wärmegealtert, gefolgt von einer 10-tägigen Lichtalterung in einer Atlas CPS+-Lichtkammer. Die Xenon-Lichtquelle simulierte dabei ein tageslichtähnliches Spektrum hinter Fensterglas (250–765 nm) mit einem Tageslichtfilter, der UV-Strahlung ausschloss. Die Bestrahlungsstärke betrug 600 W/m² über das gesamte Wellenlängenspektrum.

Für die Festigungsversuche wurden 0,5 % und 2 % Lösungen mit Klucel® G sowie Klucel® E angesetzt. Klucel® G und E unterscheiden sich in ihrem Molekulargewicht (370.000 bzw. 80.000 g/mol) und damit in ihrer Viskosität bei gleichbleibender Konzentration (siehe Abbildung 8). Ziel war es, den Einfluss der Viskosität auf die Festigung zu untersuchen. Die Lösungen wurden mit einer Pipette in definierten Mengen von 0,9 ml auf die Probekörper aufgetragen, sodass diese optisch vollständig benetzt wurden. Die vollständige Verdunstung des Lösungsmittels wurde durch wiederholtes Wiegen der Proben kontrolliert.



Abbildung 8 links: nicht gefestigt, rechts: gefestigt.

3. Auswertung

Zur Bewertung wurden die visuelle Begutachtung, eine Vibrationssiebmaschine und ein Abklatschtest verwendet. Bei der visuellen Begutachtung wurde auf optische Verfärbungen, Glanzbildung und die Durchdringungstiefe der Lösung geachtet, die sich unter anderem an Verfärbungen des Untergrunds (Löschpapier) ablesen ließ. Die Begutachtung zeigte, dass 2 % Lösungen zu hochviskos sind, sich an der Oberfläche absetzen und einen unerwünschten Glanz verursachen, während 0,5 % Lösungen zu besseren Ergebnissen führen.

Im Vibrationssiebttest (VIBRO Nr. 65019, RETSCH® GmbH; 5 Minuten, Amplitude 40, Maschenweite 1,0 mm) wurde die Gesamtstabilität der Probekörper geprüft – im Gegensatz zum Abklatschtest, der nur die Oberflächenstabilität erfasst. Dazu wurden die konsolidierten Proben zunächst gewogen, anschließend gesiebt und danach erneut gewogen. Aus der Gewichts Differenz lässt sich der prozentuale Anteil der gefestigten Fasern berechnen, da ungefestigte Fasern durch das Sieb fallen. Mit Klucel© E wurden durchschnittlich 99,7 % und mit Klucel© G durchschnittlich 97,7 % der Fasern gefestigt. Unter den green solvents schnitt Dowanol PM am besten ab; eine 0,5 % Dowanol PM-Lösung festigte die Fasern im Schnitt ebenso gut wie 1-Pentanol, jeweils zu 99,3 %.

Der Abklatschtest basiert auf DIN ISO 4628-7:2006-07 und wurde für die Konservierungswissenschaft (Wetten et al. 2024) adaptiert. Ein Tesafilm-Streifen wird mit einem leichten immer gleichen Gewicht 30 Sekunden auf die Probe gepresst, dann im 90°- Winkel abgezogen und auf einen hellen Karton aufgebracht. Der Anteil der abgelösten Fasern wird durch Auswertung des Schwarzpixel-Anteils im Bildbearbeitungsprogramm bestimmt. Der Abklatschtest wurde an beiden Seiten des Probekörpers durchgeführt. So kann beurteilt werden, wie gleichmäßig die Fasern durchtränkt und gefestigt werden. Bei der Auswertung zeigte sich, dass bei den meisten Lösungen vor allem die Vorderseite, bei der auch der Auftrag erfolgte, gefestigt wurden. Auf der Rückseite bleiben beim Abklatschtest jedoch ein Großteil der Fasern am Klebestreifen haften. Mit Klucel© G Lösungen konnten auf der Rückseite mehr Fasern gefestigt werden als mit den Klucel© E Lösungen. Die besten Festigungsergebnisse gab es bei Dowanol PM. Damit konnten auf der Vorderseite über 99 % der Fasern gefestigt werden, auf der Rückseite über 74 %. Im Vergleich dazu konnten mit dem gängigen Lösungsmittel 1-Pentanol auf der Vorderseite zwar 99 % der Fasern gefestigt werden, auf der Rückseite jedoch nur 48 %.

Zusätzlich wurde ein 3D-Profilometer (Filmetrics® Profilm3D®) eingesetzt, um die Lederoberflächen vor und nach der Behandlung im µm-Bereich dreidimensional zu untersuchen (siehe Abbildungen 9 und 10). Das Gerät arbeitet auf Basis der berührungslosen optischen Weißlichtinterferometrie. Dieser Ansatz ist auf dem Gebiet der Konservierung und Restaurierung bislang neu. Da die Messungen einen erheblichen Zeitaufwand erfordern, wurde die Methode nicht auf alle Probekörper angewendet, sondern nur auf ausgewählte Exemplare. Als Beispiel wurde ein mit Klucel© G in Dowanol PM (0,5 %) konsolidierter Probekörper gewählt, da dieser sehr gute Festigungsergebnisse erzielte. Das Höhenprofil zeigt, dass die Probekörper durch die Konsolidierung geringfügig kompakter wurden, wobei die Höhendifferenz lediglich 0,3 mm beträgt. Die 3D-Ansicht bestätigt, dass die Faserstruktur selbst kaum verändert wurde – einzelne Fasern sind nach der Behandlung weiterhin deutlich erkennbar. Insgesamt bestätigt die Auswertung mit dem 3D-Profilometer, dass die Konsolidierung kaum optische Veränderungen an den Probekörpern verursacht.

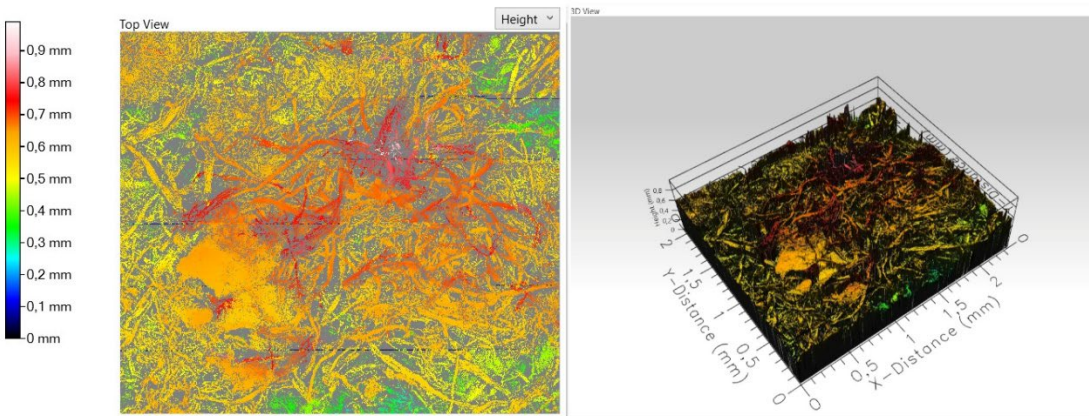


Abbildung 9 Probe für das 3D-Profilometer vor der Konsolidierung.

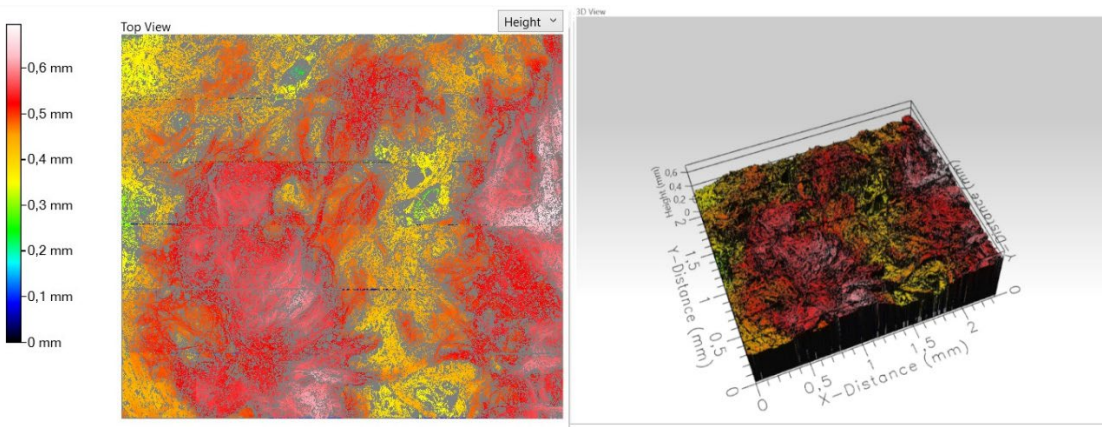


Abbildung 10 Probe für das 3D-Profilometer nach der Festigung mit Klucel® G in Dowanol (0,5 %).

Ausgewählte Proben wurden darüber hinaus mit der Multiphotonenmikroskopie untersucht, um zu visualisieren, wie das Klucel© im Leder verteilt ist und ob die Konsolidierung die Faserstruktur verändert. Nach der Konsolidierung erscheint die Faserstruktur unter dem Multiphotonenmikroskop kompakter als zuvor, was sich bei den 3D profilometrischen Messungen gezeigt hat. Zwischen den Kollagenfasern ist ein unstrukturiertes, fluoreszierendes Material sichtbar, das die Zwischenräume ausfüllt und vermutlich dem eingebrachten Klucel© entspricht. Die Fluoreszenz ist auf der Seite, auf die die Konsolidierungslösung

aufgetragen wurde, stärker ausgeprägt, was darauf hindeutet, dass sich dort mehr Klucel© abgelagert. Der Querschnitt zeigt jedoch, dass die erhöhte Fluoreszenz im gesamten Probekörper nachweisbar ist. Dies belegt, dass die Konsolidierungslösung den Probekörper vollständig durchdringt und nicht nur oberflächlich wirkt – ein Befund, der die Ergebnisse des Abklatschtest und des Vibrationssiebttests auf mikrostruktureller Ebene stützt.

Auf Basis dieser Untersuchungen wurde Klucel© G in Dowanol PM, 0,5 %, für weitere Untersuchungen an Büchern ausgewählt.

4. Entwicklung und Testen der Aerosolkammer

Da das bereits stark geschädigte Leder bei rotem Zerfall mechanischen Belastungen kaum standhalten kann, wurde eine kontaktfreie Applikationsmethode angestrebt. Das Vernebeln der Konsolidierungslösung bietet hier entscheidende Vorteile gegenüber dem Pinsel (Pataki-Hundt und Hummert 2016).

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Druckluftvernebler der Firma Sommer-Technik GmbH erprobt (siehe Abbildung 11). Der Breitstrahlzerstäuber schied aufgrund seines zu großen Sprühradus aus. Der Zwerg-Zerstäuber hingegen überzeugte durch seinen kontrollierten Sprühwinkel von maximal 30°, seine kompakte Bauweise und seine Lösungsmittelbeständigkeit. Bei einem Betriebsdruck von 2 – 3 bar und einem Arbeitsabstand von 20 bis 30 cm konnten die fragilen Probekörper mit einer 0,5 % Klucel© G-Lösung in Dowanol PM erfolgreich gefestigt werden, ohne dass Fasern abgetragen wurden. Höhere Konzentrationen erwiesen sich als nur begrenzt oder nicht vernebelfähig. Das Vernebeln von Lösungsmitteln stellt aufgrund ihrer niedrigen Oberflächenspannung generell eine Herausforderung dar und scheint nur mit Druckluftverneblern realisierbar zu sein – Ultraschallvernebler schieden daher von vornherein aus (Pataki 2006 und Pataki-Hundt 2011). Die ermittelte durchschnittliche Tröpfchengröße von 50 µm bestätigt, dass die Applikation im Aerosolbereich erfolgt (Hulburt, Hanratty 2002).



Abbildung 11 „Zwerg“ Zerstäuber der Firma Sommertechnik GmbH.

In Zusammenarbeit mit der Firma BELO Restaurierungsgeräte GmbH wurden die Pläne für eine modulare Kammer erarbeitet und als Prototyp realisiert (siehe Abbildung 12). Das KMU brachte dabei seine technische Expertise im Konstruieren von Restaurierungsgeräten ein, insbesondere hinsichtlich der Bauweise mit Aluminium-Vierkantmodulen. Vorgesehen war ein Modul zum Besprühen der Bücher mit direkter Absaugung (siehe Abbildung 13) der Lösungsmitteldämpfe (Aktivkohlefilter) und ein weiteres Modul zum Abdampfen der behandelten Objekte. Das System der Kammer ist dabei sowohl eine Schutzmaßnahme für den Bediener – da Aerosole lungengängig und damit toxisch sind – als auch ein Mittel, den Lösungsmittelüberschuss im geschlossenen Kreislauf zu halten und die zirkuläre Wertschöpfung zu realisieren. Die zweiteilige Konstruktion aus transparentem Makrolon® erlaubt die gleichzeitige Behandlung mehrerer Objekte und ist flexibel an unterschiedliche Objektgrößen anpassbar. Der Prototyp hat sich im Projektverlauf bewährt und bildet die Grundlage für eine Weiterentwicklung.

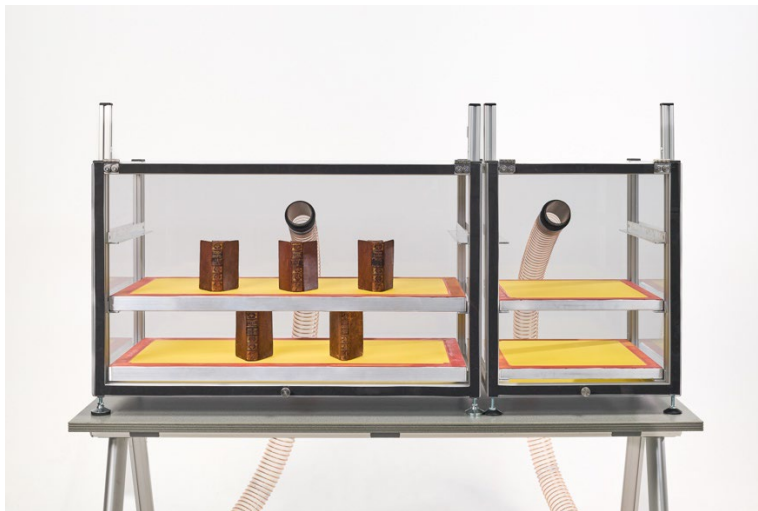


Abbildung 12 Prototyp Kammer.

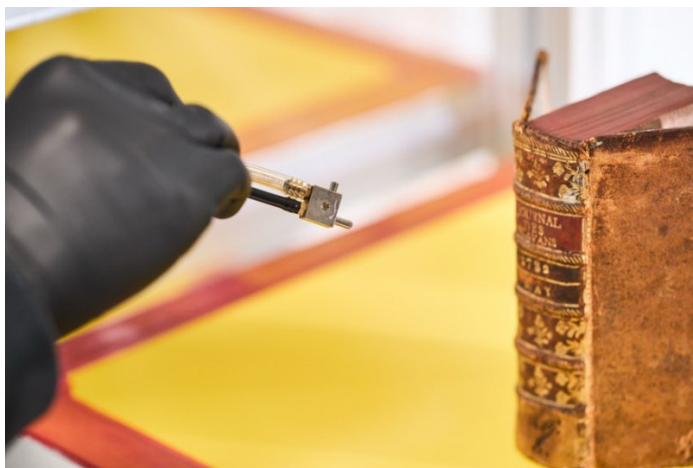


Abbildung 13 Sprühvorgang in der Kammer.

5. Praxistests an Originalobjekten

Um die Übertragbarkeit der Proben auf die Praxis zu prüfen, stellten die Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf sowie die Staatsbibliothek zu Berlin Objekte mit rotem Zerfall für Festigungsversuche zur Verfügung. Von der ULB Düsseldorf wurden elf Bücher und fünf Lederfragmente bereitgestellt; von der Staatsbibliothek zu Berlin kamen weitere elf Bücher hinzu. Alle Objekte wurden zunächst fotografisch dokumentiert, ihre Schrumpfungstemperatur gemessen und die Gerbstoffart bestimmt. Abklatschproben vor und nach der Festigung dienten dazu, die Wirksamkeit an Originalobjekten zu überprüfen.

Die Festigung erfolgte mit Klucel® G in Dowanol PM (0,5 %) unter Einsatz des Zwerg-Zerstäubers (siehe Abbildung 14). Im Projektverlauf hat sich eine praxistaugliche Vorgehensweise etabliert: Die Objekte werden leicht aufgefächert auf einem Sieb platziert, um eine gute Belüftung und Absaugung zu gewährleisten. Der Vernebler wird in ca. 20 cm Abstand mit kreisenden Bewegungen geführt, bis der jeweilige Bereich vollständig durchfeuchtet bzw. benetzt ist. Bereiche, die nicht gefestigt werden sollen – etwa Titelschilde oder der Buchblock – können mit Folien- oder Kartonmasken abgedeckt werden. Da die 0,5 % Lösung eine vergleichsweise geringe Klebkraft aufweist, sind in der Regel mehrere Arbeitsgänge erforderlich. Besonders beanspruchte Bereiche wie Falze und Kanten sollten zwei- bis dreimal besprüht werden. Nach vollständiger Verdunstung des Lösungsmittels lässt sich der Festigungserfolg durch einen Wattestäbchentest kontrollieren: Haftet kein pulvriges Leder mehr an der Watte, ist eine ausreichende Festigung erreicht.



Abbildung 14 Auftrag des Aerosols mithilfe des Zwerg-Zerstäubers an einem originalen Band.

Die Konsolidierung der Originalobjekte verlief erfolgreich. Es traten keine oder nur sehr geringen visuellen Veränderungen, wie Dunkelfärbungen auf, und die Objekte konnten nach der Behandlung ohne Materialverlust gehandhabt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass sich die im Labor erarbeitete Methode auf Originalobjekte übertragen lässt.

6. Projektergebnisse

Aus der Literaturrecherche und den Vorversuchen gingen drei green solvents – Ethyllactat, Dowanol PM und MMB – sowie 1-Pentanol als Referenz in die Konsolidierungsversuche ein. Die Versuche an den Probekörpern zeigten, dass 2 % Lösungen ungeeignet sind: Sie sind zu hochviskos, durchdringen die Probekörper nicht vollständig und hinterlassen einen unerwünschten Oberflächenglanz. Für die Lederfestigung wurde daher eine Konzentration von 0,5 % bevorzugt.

Unter den getesteten green solvents erzielte Dowanol PM die besten Ergebnisse. Im Vibrationssiebstest, der die Gesamtstabilität der Probekörper abbildet, erreichte eine 0,5 % Dowanol PM- Lösung mit Klucel© G gute Festigungsergebnisse von 99,3 %. Der entscheidende Vorteil von Dowanol PM zeigte sich im Abklatschtest, der die Penetrationstiefe widerspiegelt: Während 1-Pentanol auf der Rückseite der Probekörper lediglich 48 % der Fasern festigte, erreichte Dowanol PM dort über 74 % – ein erheblicher Unterschied, der auf den niedrigeren Dampfdruck und die damit verbundene längere Eindringzeit zurückzuführen ist.

Die Multiphotonenmikroskopie bestätigte, dass das Klucel© nach der Festigung mit Dowanol PM gleichmäßig im gesamten Probekörper verteilt ist: Eine erhöhte Fluoreszenz über den gesamten Querschnitt belegt das vollständige Durchdringen. Die 3D-Profilometrie zeigte, dass die Festigung die Faserstruktur kaum verändert und die Oberfläche nur geringfügig kompakter wird, wobei einzelne Fasern jedoch klar erkennbar bleiben. Diese Befunde bestätigen gemeinsam, dass Klucel© G in Dowanol PM (0,5 %) das optimale Verhältnis aus Viskosität, Penetrationstiefe und Materialverträglichkeit bietet und damit als gleichwertiger Ersatz für das bislang eingesetzte Butanol gelten kann.

Das berührungsfreie Vernebeln der Konsolidierungslösung war ein zentrales Projektziel, da das fragile, von rotem Zerfall befallene Leder mechanische Belastungen durch Pinsel kaum toleriert. Der Zwerg-Zerstäuber der Firma Sommer-Technik GmbH erwies sich als geeignetes Applikationsinstrument: Mit einem Sprühwinkel von maximal 30° und einer ermittelten durchschnittlichen Tröpfchengröße von 50 µm liegt die Applikation im Aerosolbereich und erlaubt eine präzise, kontrollierte Festigung. Bei 2- 3 bar Betriebsdruck und einem Arbeitsabstand von ca. 20- 30 cm wurden die Fasern nicht abgetragen. Das Vernebeln von Lösungsmitteln stellt aufgrund ihrer niedrigen Oberflächenspannung generell eine Herausforderung dar.

Für den Einsatz in größeren Beständen wurde gemeinsam mit der Firma BELO Restaurierungsgeräte GmbH eine modulare Aerosolkammer entwickelt und ein Prototyp gefertigt. Die zweiteilige Kammer aus transparentem Makrolon® – ein Modul zur Konsolidierung und weiteres zum kontrollierten Abdampfen – erlaubt die gleichzeitige Behandlung mehrerer Objekte und ist flexibel an unterschiedliche Objektgrößen anpassbar. Das geschlossene System hält den Lösungsmittelüberschuss im Kreislauf und zielt damit auf eine nahezu vollständige Lösungsmittelausnutzung im Sinne der zirkulären Wertschöpfung ab. Der Prototyp hat sich im Projektverlauf bewährt und bildet die Grundlage für eine Weiterentwicklung.

Die Übertragbarkeit der Proben wurde an Originalobjekten der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf sowie der Staatsbibliothek zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, geprüft. Die Festigung mit Klucel© G in Dowanol PM (0,5 %) verlief an allen Objekten erfolgreich. Es traten keine visuellen Veränderungen wie Dunkelfärbungen auf, und die Objekte konnten nach der Behandlung ohne Materialverlust gehandhabt werden. Der Wattestäbchentest bestätigte, dass kein pulvriges Leder mehr an der Oberfläche haftet. Die Praxiserprobung zeigt damit, dass die Methode zuverlässig auf Originalobjekte übertragbar ist – und dass mit Dowanol PM erstmals ein green solvent zur Verfügung steht, das hinsichtlich Festigungswirkung und Materialverträglichkeit mit dem bislang eingesetzten Butanol vergleichbar ist, dabei aber umweltverträglicher ist.

Aus den Praxisergebnissen lässt sich folgende Empfehlung ableiten:

- **Konsolidierungslösung:** 0,5 % Klucel® G in Dowanol PM; höhere Konzentrationen sind nicht vernebelnähig und können einen unerwünschten Oberflächenglanz hinterlassen
- **Vernebler:** Zwerg-Zerstäuber (Sommer-Technik GmbH) mit Druckluft, da Ultraschallvernebler für Lösungsmittel ungeeignet sind.
- **Arbeitsabstand und -technik:** ca. 20 cm Abstand, kreisende Bewegungen, bereichsweise vorgehen bis zur vollständigen Durchtränkung
- **Anzahl der Arbeitsgänge:** Bei stark geschädigten Bereichen wie Falzen und Kanten zwei- bis dreimalige Applikation empfohlen; nach kurzem Zwischentrocknen mit Abdampfen, wiederholen
- **Abdeckung:** Nicht zu festigende Bereiche (Titelschilde, Buchblock) mit Folien- oder Kartonmaske schützen
- **Erfolgskontrolle:** Nach vollständiger Lösungsmittelverdunstung Wattestäbchentest durchführen – kein Abrieb zeigt ausreichende Festigung an
- **Arbeitsschutz:** Applikation ausschließlich unter Abzug oder in der Aerosolkammer; Aerosole sind lungengängig und dürfen nicht eingeatmet werden; Lösungsmitteldämpfe über das Absaugsystem ableiten

7. Diskussion

Die verschiedenen Bewertungsmethoden zeigen, welche grünen Lösungsmittel sich für die Lederkonsolidierung eignen und wie sie im Vergleich zu dem bisher verwendeten 1-Pentanol wirken. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen belegen, dass Dowanol PM ein wirksames und umweltfreundliches Lösungsmittel für die Konsolidierung von durch roten Zerfall geschädigtem vegetabil gegerbten Leder darstellt.

Für die Versuche wurde künstlich gealtertes, vegetabil gegerbtes Kalbsleder verwendet, um die Schäden des roten Zerfalls zu simulieren. Die Proben wurden durch Zermahlen der Lederfasern und anschließendes Pressen in Formen präpariert, um die brüchige, pulverartige Beschaffenheit degradierten Leders nachzuahmen.

Eine 0,5 % Klucel® G- Lösung in Dowanol PM dringt tief in die Lederstruktur ein. 2 % Lösungen erwiesen sich dagegen als weniger geeignet, da sie zu sichtbaren Veränderungen führen und lediglich eine oberflächliche Konsolidierung bewirken – was den Anforderungen an ein Konsolidierungsmittel nicht gerecht wird.

Die 0,5 % Konzentration gewährleistet eine gleichmäßige, durchdringende Konsolidierung ohne sichtbare Verdunkelung oder andere unerwünschte Veränderungen des Ledererscheinungsbildes. Mechanische Tests (u. a. Abklatschmethode, Vibrationsmethode, etc) bestätigen, dass diese Konsolidierungsmethode die Festigkeit und mechanische Widerstandsfähigkeit deutlich verbessert.

Nach der Konsolidierung zeigt die Multiphotonenmikroskopie eine verdichtete Faserstruktur sowie eine erhöhte Fluoreszenz im gesamten Probenbereich, was auf eine gleichmäßige Verteilung des Klucel® innerhalb des Leders hindeutet. Die 3D-Profilometrie offenbart minimale Veränderungen der Oberflächentopographie, darunter eine leichte Verdichtung der Faseroberfläche, während die Grundstruktur und Fasersichtbarkeit erhalten bleiben. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Konsolidierungsprozess die Morphologie des Leders nicht negativ beeinflusst.

Die 0,5 % Klucel® G-Konzentration bietet ein optimales Gleichgewicht zwischen Viskosität und Eindringtiefe, sodass sowohl Oberflächen- als auch Tiefenfasern effektiv konsolidiert werden. Die Applikation der Konsolidierungslösung mittels eines Zwergverneblers ermöglicht eine präzise, berührungslose Sprühmethode, die das Risiko weiterer mechanischer Schäden minimiert und durch gezielte Auftragung den Lösungsmittelverbrauch reduziert, ohne einen Überschuss zu erzeugen. Eine prototypische, modulare Konsolidierungskammer wurde entwickelt, die eine gleichzeitige Konsolidierung und Lösungsmittelverdampfung mehrerer Objekte ermöglicht.

Die reinen Filmproben aus Klucel® G in Ethyllactat, Dowanol PM und MMB wurden künstlich gealtert, wobei weitere Untersuchungen sowie eine künstliche Alterung an Lederproben erforderlich sind. Dies sind zukünftige Forschungsansätze, die bisher noch nicht durchgeführt wurden. Zudem sind weitere mechanische Tests geplant, um die Flexibilität vor und nach der Lösungsmittelapplikation zu prüfen. Diese Tests befinden sich in Vorbereitung.

8. Öffentlichkeitsarbeit und Resonanz

Die hier vorgestellten Forschungsergebnisse wurden in der Zeitschrift Restaurator

(https://www.degruyterbrill.com/de/journal/key/rest/html?srsltid=AfmBOopT8nlvPJc1RVVnRGhFZ5mJljsSnL9kzwuDRMwHgd5N_gt3sd3s) als wissenschaftliche Publikation auf Englisch eingereicht (Titel: „Green

solvents for the consolidation of vegetable-tanned leather with aerosols, A Pataki-Hundt, M Linden, M Börngen) und befinden sich noch im Double-Blind- Peer-Review Verfahren. Die Zeitschrift hat den Anspruch, wissenschaftliche Forschungsergebnisse zu besprechen, die aber auch in die Praxis übertragbar und anwendbar sind. Die internationale Leserschaft umfasst Conservation Scientists, Lehrende, wissenschaftlich agierende Restaurator*innen als auch praktisch arbeitende Restaurator*innen.

Das CICS hat die Forschungsergebnisse der green solvents in die Lehreinheit „Lösemittel in der Restaurierung“ aufgegriffen und an die Studierenden weitergegeben. Dieses Modul leitet Frau Prof. Dr. Ester Ferreira. Das Interesse und die Neugierde, nachhaltige und grüne Lösemittel zu verwenden, wird stetig ausgebaut. Das Projekt ist auch auf der Homepage des CICS zu finden: https://www.th-koeln.de/hochschule/dbu-projekt---green-solvents-zur-festigung-von-ledern-mit-aerosolen_115955.php

Maike Linden, M.A., hat die Inhalte des Projekts bei der internationalen IADA Tagung am 08. September 2025 (<https://iada-home.org/wp-content/uploads/2025/08/Schedule-A4-080125.pdf>) mit dem Titel „Green solvents’: Consolidation of Vegetable-Tanned Leather with Aerosols“ vorgetragen. Die Resonanz hiervon war sehr gut. Es hat sich eine Diskussion über die Anwendbarkeit, den Umgang mit green solvents und die verwendeten Celluloseether entspannt.

Im Rahmen einer virtuellen Fortbildung der ICOM-CC Working Group Graphic Documents (Chair: Andrea Pataki-Hundt) in Kooperation der Working Group Leather and Related Materials (Chair: Rosie Bolton) hat Maike Linden M.A. einen Vortrag „Green solvents for stabilizing red rot leather using aerosols“ gehalten. Diese Veranstaltung fand am 24. November 2025 statt (<https://www.icom-cc.org/en/newsletters/graphic-documents-working-group-newsletter-7-march-2026>).

Frau Linden hat die Mitarbeit und die Präsentation der Inhalte auf internationalen Tagungen zur Profilierung Ihrer Arbeitstechniken und Aufnahme neuer Techniken erfolgreich und nachhaltig genutzt.

Im Sommersemester 2026 hat Frau Sofia Nicolai, Studierende der Studienrichtung „Konservierung und Restaurierung von Schriftgut, Grafik, Buchmalerei und Fotografie“ eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Hydroxypropylcellulose (Klucel®) in Green solvents“ erstellt, wo es um die Eruierung der thermischen Stabilität von Celluloseether geht, die unter anderem in green solvents gelöst sind. Dies basiert auf den Forschungsarbeiten von Pataki-Hundt, Pesch und Börngen, 2022: „Klucel® –Variations to Consolidate Degraded Red Leather“. Leather 2022: 12th Interim Meeting of the ICOM-CC Leather and Related Materials Working Group (Amersfoort, Niederlande), October 2022. Das bedeutet, dass die Forschungen auf dem Gebiet der green solvents auch im Kontext der Langzeitstabilität im Rahmen von Qualifizierungsarbeiten weitergetrieben und vertieft werden.

Die Staatsbibliothek zu Berlin, Preußischer Kulturbesitz, hat uns für das Projekt eine Reihe von Ledereinbänden mit dem Schaden roter Zerfall zur Verfügung gestellt. Diese waren über den Projektverlauf

am CICS in Köln. Die Rückführung der Buchbestände wurde dazu benutzt, um einen eintägigen Workshop in den Räumlichkeiten der Staatsbibliothek am 09. Juli 2026 zu geben, um die Inhalte des Projekts an der Sammlung vorzustellen und auch in die Praxis zu überführen (siehe Abbildung 15). Die Resonanz war sehr gut, die Anwendung wurde von den vielen Teilnehmer*innen sehr gut aufgenommen und gleich mit den technischen Möglichkeiten in der Werkstatt der Buchrestaurierung Unter den Linden, Berlin, erfolgreich angewendet.



Abbildung 15 Lederband der Staatsbibliothek zu Berlin während der Lederfestigung in einem Abzug im Rahmen der eintägigen Fortbildung 2026.

9. Fazit und Ausblick

Das Projekt „Green solvents zur Festigung von vegetabil gegerbtem Leder mit Aerosolen“ hat gezeigt, dass sich der Einsatz umwelt- und gesundheitsverträglicher Lösungsmittel für die Konsolidierung von rotem Zerfall erfolgreich realisieren lässt. Unter den drei untersuchten green solvents – Dowanol PM, Ethyllactat und MMB – erwies sich Dowanol PM in Kombination mit Klucel® G (0,5 %) als besonders geeignet: Es erreichte im Vibrationssiebstest und im Abklatschtest die besten Festigungs- und Penetrationswerte und war dabei dem bislang verwendeten, aber gesundheits- und umweltschädlichen 1-Pentanol ebenbürtig oder überlegen.

Multiphotonenmikroskopie und 3D-Profilometrie bestätigten zudem, dass die Konsolidierungslösung das Leder vollständig durchdringt, ohne dessen Faserstruktur oder Oberflächenbeschaffenheit sichtbar zu verändern.

Mit der Anwendung eines Zwerg-Zerstäubers als geeignetem Applikationswerkzeug und der Entwicklung eines modularen Aerosolkammer-Prototyps in Zusammenarbeit mit der Firma BELO Restaurierungsgeräte GmbH wurde erstmals eine praxistaugliche, berührungsfreie Applikationstechnik für die großflächige Anwendung an Bibliotheksbeständen erarbeitet. Die erfolgreichen Praxistests an Originalobjekten der Universitäts- und Landesbibliothek Düsseldorf und der Staatsbibliothek zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, belegen, dass sich die im Labor entwickelte Methode zuverlässig auf historische Bestände übertragen lässt.

Damit steht der Restaurierungspraxis erstmals eine Alternative zum toxischen und leicht entflammaren Butanol zur Verfügung, die eine vergleichbare Festigungsleistung bei deutlich geringerer Umwelt- und Gesundheitsbelastung bietet. Die Ergebnisse wurden über Fachvorträge auf internationalen Tagungen (IADA, ICOM-CC), einen Praxisworkshop an der Staatsbibliothek zu Berlin sowie eine eingereichte Publikation in der Zeitschrift Restaurator in die Fachöffentlichkeit getragen und in die Lehre am CICS integriert.

Für die Zukunft besteht weiterer Forschungsbedarf in der künstlichen Alterung der reinen Klucel®-Filmproben in den drei green solvents, um deren Langzeitstabilität zu bewerten – eine Fragestellung, die 2026 im Rahmen einer Bachelorarbeit am CICS vertieft wurde. Ebenso sollten weitere mechanische Tests zur Flexibilität des Leders vor und nach der Behandlung sowie eine Optimierung der Aerosolkammer für den Serieneinsatz in größeren Bibliotheksbeständen

angestrebt werden. Langfristig könnte die entwickelte Methode dazu beitragen, dass ein bislang von der Massenentsäuerung ausgeschlossener Bestandteil historischer Sammlungen – vegetabil gegerbte Lederbände mit rotem Zerfall – wieder in größerem Umfang katalogisiert, digitalisiert und für die wissenschaftliche Nutzung zugänglich gemacht werden kann.

10. Literaturangaben

Alder, C. M., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Redman, A. M., Shukla, L., Shuster, L. E.; Sneddon, H. F.: Updating and further expanding GSK's solvent sustainability guide. In: *Green Chemistry*, 2016, 18, S. 3879–3890.

Anastas, P. T., Warner, J. C.: *Green Chem.: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York (1998), p. 30.

Carsote, C., Badea, E. Micro differential scanning calorimetry and micro hot table method for quantifying deterioration of historical leather. *Herit Sci* 7, 48 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0292-8>
Fife, Gwendoline R.: *Greener Solvents in Conservation. An Introductory Guide*. London 2021.

Chahine, C. "Changes in hydrothermal stability of leather and parchment with deterioration: A DSC study." *Thermochimica Acta*, 365(1–2), 2000: 101–110. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00617-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00617-1)

Hulburt, E.; Hanratty, T.: Measurement of drop size in horizontal annular flow with the immersion method. In: *Experiments in Fluids* 32, 2002, S. 692–699.

Nicolai, S.: Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Hydroxypropylcellulose (Klucel®) in Green solvents, Unveröff. Bachelorarbeit. TH Köln 2026.

Pataki, A.: Konsolidierung von pudernden Malschichten mit Aerosolen, Veränderung der Reflexionseigenschaften und des Farbeindrucks. In: *Restauro* 113 (2007), S. 110–117.

Pataki-Hundt, A., Hummert, E. Colour stability of natural adhesives, Light ageing of adhesive films and colour changes of pigment layers after aerosol application, *Restaurator* 37 (2016): 137-156.

Pataki-Hundt, A.: Funktionsweise von Nebulizern und eine Neuentwicklung für organische Lösungsmittelsysteme. In: *Arbeitsblätter des Arbeitskreises Nordrhein-Westfälischer Papierrestauratoren*, 20. Arbeitsgespräch, 4. bis 5. April 2011, Bielefeld-Sennestadt, Neuss (2012), S. 67–76.

Pataki-Hundt, A., Pesch, K. Börngen, M. 2022. 'Klucel® –Variations to Consolidate Degraded Red Leather'. Leather 2022: 12th Interim Meeting of the ICOM-CC Leather and Related Materials Working Group (Amersfoort, Niederlande), October 2022.

Pataki-Hundt, Andrea: *Einflussgrößen auf den Farbeindruck von pudernden Malschichten beim Konsolidieren mit Aerosolen*. Promotionsarbeit, KIT, Karlsruhe 2006.

Prat, D., Wells, A., Hayler, J., Sneddon, H., McElroy, C. R., Abou-Shehadad, S., Dunne, P.: CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents. In: *Green Chemistry*, 2016, 18, S. 288–296.

Schatz, J.: *Versuchsaufbau zur Untersuchung des Penetrationsverhaltens bei der Lederfestigung*. Unveröff. Bachelorarbeit. TH Köln 2024.

M. Schmeltz, L. Robinet, S. Heu-Thao, J.-M. Sintès, C. Teulon, G. Ducourthial, P. Mahou, M.-C. Schanne-Klein, G. Latour, Noninvasive quantitative assessment of collagen degradation in parchments by polarization-resolved SHG microscopy. *Sci. Adv.* 7, eabg1090 (2021).

Wetten, Juliana: *Konservatorischer Umgang mit arsenbelastetem Bibliotheksgut*. Unveröff. Bachelorarbeit. TH Köln 2021.

Wetten, J., A. Pataki-Hundt, K. Deering, M. Börngen, D. Presslmayr, E. Spiegel, H. Flock, and D. Blumenroth. 2024. "Arsenic Pigments in Libraries – Testing Methods, Contaminated Spaces, and Occupational Safety Measures." *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material* 45 (4): 297–323. <https://doi.org/10.1515/res-2024-0009>

Wypych, A., Wypych, G.: *Databook of Green solvents*. Toronto 2019.

11. Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 BUCH MIT ROTEM ZERFALL, ZU ERKENNEN AN DER ROTEN PUDRIGEN OBERFLÄCHE	5
ABBILDUNG 2 VERSCHWÄRZTES LEDER DURCH DEN KONTAKT MIT WASSER VERURSACHT.	5
ABBILDUNG 3 MULTIPHOTONENMIKROSKOPIE VON UNGEALTERTEM LEDER (LINKS) UND GEALTERTEM LEDER (RECHTS).	11
ABBILDUNG 4 OBEN: UNGEALTERTES LEDER, UNTEN: GEALTERTES LEDER NACH HITZE- UND KLIMAALTERUNG.	12
ABBILDUNG 5 ZERREIBEN DES GEALTERTEN LEDERS ZU FASERN.	12
ABBILDUNG 6 PRESSEN DER PROBEKÖRPER.	12
ABBILDUNG 7 FERTIG PRÄPARIERTE PROBEN	12
ABBILDUNG 8 LINKS: NICHT GEFESTIGT, RECHTS: GEFESTIGT.	14
ABBILDUNG 9 PROBE FÜR DAS 3D-PROFILOMETER VOR DER KONSOLIDIERUNG.	16
ABBILDUNG 10 PROBE FÜR DAS 3D-PROFILOMETER NACH DER FESTIGUNG MIT KLUCEL® G IN DOWANOL (0,5 %).	16
ABBILDUNG 11 „ZWERG“ ZERSTÄUBER DER FIRMA SOMMERTECHNIK GMBH.	17
ABBILDUNG 12 PROTOTYP KAMMER.	18
ABBILDUNG 13 SPRÜHVORGANG IN DER KAMMER.	18
ABBILDUNG 14 AUFTRAG DES AEROSOLS MITHILFE DES ZWERG-ZERSTÄUBERS AN EINEM ORIGINALEN BAND.	20
ABBILDUNG 15 LEDERBAND DER STAATSBIBLIOTHEK ZU BERLIN WÄHREND DER	25

12. Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 AUSWAHL AN GREEN SOLVENTS, DIE IM RAHMEN DES PROJEKTS UNTERSUCHT WURDEN.	7
TABELLE 2 DIE SCHRUMPFUNGSTEMPERATUR VON UNGEALTERTEM UND GEALTERTEM LEDER, GEMESSEN MIT DER MICRO-HOT-TABLE-METHODE (MHT) UND DER DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC).....	10

13. Abbildungs- und Tabellennachweis

Abbildung 1: Maike Linden, M.A.
Abbildung 2: Maike Linden, M.A.
Abbildung 3: Laurianne Robinet, Paris.
Abbildung 4: Maike Linden, M.A.
Abbildung 5: Maike Linden, M.A.
Abbildung 6: Maike Linden, M.A.
Abbildung 7: Maike Linden, M.A.
Abbildung 8: Maike Linden, M.A.
Abbildung 9: Marlen Börngen, M.A.
Abbildung 10: Marlen Börngen, M.A.
Abbildung 11: Maike Linden, M.A.
Abbildung 12: Patrick Schwarz, KISD.
Abbildung 13: Patrick Schwarz, KISD.
Abbildung 14: Marlen Börngen, M.A.
Abbildung 15: Andrea Pataki-Hundt

Tabelle 1: Maike Linden, M.A.
Tabelle 2: Maike Linden, M.A.