

Fakultät Bauen und Erhalten

Konservierung und Restaurierung B.Sc.

Vertiefungsrichtung Möbel, Holzobjekte und Materialkombinationen

Beständigkeit von mit UV-stabilisierenden Zusätzen versetzten transparenten Möbelüberzügen

BACHELORARBEIT

Vorgelegt von

Lina Menzel, Matr.Nr.: 130730, 6. Fachsemester

Erstprüferin: Prof. Dr. Julia Schultz

Zweitprüfer: Jarno Riefer, M. Sc.

Abgabedatum: 19.06.2026

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

„Beständigkeit von mit UV-stabilisierenden Zusätzen versetzten transparenten Möbelüberzügen“

selbständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, durchgängig unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht worden sind. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen. Ich erkläre hiermit, dass ich beim Einsatz von IT-/KI-gestützten Schreibwerkzeugen diese Werkzeuge unter der Rubrik „7.3 Verwendete Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen, meiner Bezugsquelle und einer Übersicht des im Rahmen dieser Arbeit genutzten Funktionsumfangs vollständig aufgeführt habe. Die mit IT-/KI-gestützten Schreibwerkzeugen erstellten Inhalte habe ich steuernd bearbeitet. Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe oder diese als Veröffentlichung erschienen ist.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Die Beständigkeit transparenter Möbelüberzüge gegenüber elektromagnetischer Strahlung ist für den Erhalt ihrer ästhetischen Wirkung und ihrer Schutzfunktion maßgeblich.¹ Unter Lichteinwirkung können photochemische Degradationsprozesse ausgelöst werden, die beide Funktionen der Überzugsfilme beeinträchtigen.² Diese Arbeit untersucht die UV-Beständigkeit ausgewählter transparenter Möbelüberzüge unter Zusatz zweier UV-Stabilisatoren. Hierzu wurden Probekörper mittels UVC-Strahlung künstlich photochemisch gealtert. UV-induzierte Eigenschaftsveränderungen wurden durch makroskopische und mikroskopische Beobachtungen sowie durch quantitative Farb- und Glanzwertmessungen evaluiert. Unter den gewählten Versuchsbedingungen zeigten die Überzugssysteme deutlich unterschiedliche photochemische Stabilitäten (Regalrez® 1126 >> Schellack > Nitrocelluloselack). Die Ergebnisse weisen auf eine positive, jedoch systemabhängige stabilisierende Wirkung des eingesetzten sterisch gehinderten Amins (HALS) hin. Der erprobte UV-Absorber erwies sich dagegen systemunabhängig als unbeständig gegenüber Strahlung im UVC-Spektrum. Insgesamt liefern die Befunde erste Hinweise darauf, dass UV-Stabilisatoren die Beständigkeit transparenter Möbelüberzugsmaterialien verbessern können, zugleich bleibt die unmittelbar praktische Aussagekraft der Ergebnisse aufgrund der gewählten Versuchsbedingungen begrenzt. Für eine konservatorische Anwendung sind daher weiterführende Untersuchungen erforderlich, um die Wirksamkeit unter praxisnäheren Bedingungen zu überprüfen und sicherzustellen, dass die Additive den grundlegenden Anforderungen an die Schonung des Objektes entsprechen.

¹ Vgl. DE LA RIE 1992, S. 63f.

² Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 134.

Abstract

The durability of transparent furniture coatings against electromagnetic radiation is important for maintaining their aesthetic appearance and protective function.³ Exposure to light can cause photochemical degradation processes that impair both functions of the coating films.⁴ This thesis investigates the UV resistance of selected transparent furniture coatings with the addition of two UV-Stabilizers. To this purpose, samples were artificially photochemically aged using UVC radiation. UV-induced changes in properties were evaluated through macroscopic and microscopic examinations as well as quantitative measurements of colour and gloss. Under the selected test conditions, the coating systems showed different degrees of photochemical stability (Regalrez® 1126 >> shellac > nitrocellulose varnish). The results indicate a positive, coating system-dependent, stabilising effect of the hindered amine light stabilizer (HALS) used. The UV absorber tested, on the other hand, was found to be unstable against radiation in the UVC spectrum, regardless of the system. Overall, the findings provide initial evidence that UV stabilizers can improve the durability of transparent furniture coating materials; however, the practical significance of the results remains limited due to the chosen test conditions. For conservation applications, therefore, further investigations are required to verify their effectiveness under more practice-oriented conditions and to ensure that the additives fulfill the fundamental requirements for the preservation of the objects.

³ Vgl. DE LA RIE 1992, S. 63f.

⁴ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 134.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Begriffserklärung	3
1 Einleitung.....	4
2 Stand der Forschung.....	6
3 Theoretischer Hintergrund.....	11
3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse	11
3.2 UV-Stabilisatoren	18
4 Materialien und Methoden.....	22
4.1 Auswahl der zu erprobenden Materialien.....	22
4.1.1 Transparente Überzugssysteme.....	22
4.1.2 UV-stabilisierende Zusätze	26
4.2 Herstellung der Probekörper.....	30
4.3 Künstliche Alterung der Probekörper	34
4.4 Evaluationsmethoden.....	37
4.4.1 Makroskopische und mikroskopische Bewertung	37
4.4.2 Farbwertmessungen.....	38
4.4.3 Glanzwertmessungen.....	40
4.4.4 Versuche zum Löslichkeitsverhalten	41
4.5 Allgemeiner Versuchsaufbau.....	43
5 Ergebnisse und Diskussion	45
5.1 Makroskopische und mikroskopische Betrachtung	45
5.1.1 Betrachtung unter visueller Strahlung	46
5.1.2 Betrachtung unter ultravioletter Strahlung.....	48
5.1.3 Mikroskopische Betrachtung im Durchlicht	51
5.2 Farbwertmessungen	52
5.3 Glanzwertmessungen	59
5.4 Versuche zum Löslichkeitsverhalten	63
5.5 Vergleichende Auswertung.....	64
6 Zusammenfassung und Ausblick	70
7 Verzeichnisse	73
7.1 Bibliographie.....	73
7.2 Abbildungsverzeichnis und -nachweis.....	79

7.3 Verwendete Hilfsmittel	81
7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis.....	81
8 Anhang	83

Abkürzungen und Begriffserklärung

BP	2-Hydroxybenzophenone
BTZ	2-(2-Hydroxyphenyl)-benzotriazole, -im Rahmen der Arbeit auch als Benzotriazole bezeichnet
FTIR	Die <i>Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie</i> ist eine analytische Methode, die ermittelt, wie eine Probe Infrarotstrahlung (IR) in Abhängigkeit der Wellenzahl absorbiert, um ihre molekularen Schwingungen zu erfassen. Das erzeugte IR-Spektrum kann zur Identifikation von funktionellen Gruppen und zur Charakterisierung von Materialien genutzt werden. ⁵
HALS	engl.: <i>hindered amine light stabilizers</i> - sterisch gehinderte Amine
HPT	Hydroxyphenyl-s-triazine
Photopermanenz	beschreibt wie viel Verlust des Stabilisators bei Strahlungseinwirkung zu vermerken ist. Je geringer der Verlust, desto größer die Permanenz. ⁶
UV	ultraviolette Strahlung: elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Spektrums im Wellenlängenbereich von ca. 380 bis 100 nm ⁷
UVA, UVB, UVC	Teilbereiche des UV-Spektrum in, der UVA (315-380 nm), UVB (280-315 nm) und UVC (100-280 nm) ⁸
UV-A	UV-Absorber (siehe 3.2 UV-Stabilisatoren3.2 UV-Stabilisatoren)
r. H.	engl.: relative humidity, relative Luftfeuchte
T	Temperatur
Tg	Glasübergangstemperatur - ist die Temperatur, bei der ein amorpher oder teilkristalliner Polymeranteil vom spröden Zustand in einen weichen, gummi-elastischen Zustand übergeht. Es handelt sich dabei um einen temperaturabhängigen Übergangsbereich, der mit einer deutlichen Änderung der Beweglichkeit der Polymerketten und damit der mechanischen Eigenschaften einhergeht. ⁹

⁵ Vgl. LIU/KAZARIAN 2022, S. 1777ff.

⁶ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27f

⁷ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 13f.

⁸ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

⁹ Vgl. HORIE 2010, S. 22.

1 Einleitung

Im Zuge von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen wird oftmals aus unterschiedlichsten Gründen die Aufbringung neuer Überzugsschichten auf Objektoberflächen notwendig. Diese Filme erfüllen neben der ästhetischen Wirkung auch eine Schutzfunktion für die darunterliegende Holzoberfläche.^{10 11} Als äußerste Schicht fungieren sie zudem als Grenzschrift zur Umgebung und sind auf diese Weise direkten Einflüssen wie Licht (visuelle und UV-Strahlung), Wärme, Luftsauerstoff und Schadstoffen ausgesetzt.^{12 13} Diese Umweltfaktoren fördern Prozesse der Degradation organischer Materialien wie thermische oder photochemische Autooxidation, ionischen Reaktionen oder mikrobiell bedingte Abbauprozesse.¹⁴ Dabei kann es zu Veränderungen der Materialeigenschaften, wie dem optischen Erscheinungsbild, der mechanischen Belastbarkeit und dem Löslichkeitsverhalten kommen.¹⁵ Im Evaluierungsprozess der Wahl geeigneter Materialien stehen diese materialimmanenten Degradationsprozesse im Konflikt mit der grundlegenden Anforderung die eigentliche Objektschubstanz nicht zu beeinträchtigen.¹⁶ Folglich sollten die zu erwartenden Eigenschaftsveränderungen geeigneter Materialien so gering wie möglich sein; es besteht der Anspruch nach einer guten Langzeitstabilität.¹⁷ Wesentlich ist zweifelsohne die materialeigene Stabilität, jedoch könnte eine Verlangsamung der ablaufenden Degradationsprozesse die Schutzwirkung des Überzugfilmes verlängern. Dies könnte altersbedingte Folgemaßnahmen hinauszögern und zur Schonung der Objektschubstanz beitragen.¹⁸

Materialstabilisierende Additive finden in der Lack- und Farbenindustrie eine breite Anwendung.¹⁹ In den 1980er und 1990er-Jahren fand auch im Feld der Konservierung und Restaurierung die mögliche Stabilisierung von Gemäldefirnismaterialien zunehmend Aufmerksamkeit in der Forschung (siehe 2 Stand der Forschung). Dabei zeigte speziell der Zusatz von Substanzen, welche lichtinduzierte Abbauprozesse hemmen, eine Verlangsamung der Abbauprozesse.^{20 21 22} In Bezug auf spezifische Möbelüberzugssysteme fand jedoch bislang keine breit angelegte

¹⁰ Vgl. KRUPA 2017, S. 160.

¹¹ Vgl. DE LA RIE 1992, S. 63f.

¹² Vgl. HORIE 2010, S. 37f.

¹³ Vgl. DE LA RIE 1992, S. 68.

¹⁴ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 134.

¹⁵ Vgl. HORIE 2010, S. 37.

¹⁶ Vgl. EUROPEAN CONFEDERATION OF CONSERVATOR-RESTORERS' ORGANISATIONS A.I.S.B.L. 2003, Art. 9.

¹⁷ Vgl. HORIE 2010, S. 37.

¹⁸ Vgl. ebd., S. 39f.

¹⁹ Vgl. BONNET 2025, S. 11ff7.

²⁰ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHEY 1989.

²¹ Vgl. O'MALLEY 2010, S. 5.

²² Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHEY 1990b.

Auseinandersetzung statt, obwohl in beiden Fachbereichen vergleichbare Substanzgruppen mit ähnlichen Einflussfaktoren und Prozessen der Materialalterung Anwendung finden. Einzelne Forschungsprojekte berücksichtigen im Rahmen der Untersuchung konservatorischer Fragestellungen zu Möbelüberzügen auch den Einsatz lichtstabilisierender Additive. Diese Versuche lassen Rückschlüsse hinsichtlich einer positiven Wirksamkeit dieser Zusätze auf die Materialstabilisierung von transparenten Möbelüberzügen zu.^{23 24}

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich damit, ob durch den Zusatz von materialstabilisierenden Additiven eine Verbesserung der Beständigkeit von transparenten Möbelüberzügen gegenüber ultravioletter (UV-)Strahlung erzielt werden kann. Ziel sind grundlegende Aussagen über die mögliche Verringerung UV-Strahlungsinduzierter Degradation von transparenten Überzugsmaterialien.

Dafür werden Probefilme von einem Schellack, einem Nitrocelluloselack und einem unpolaren niedermolekularen Kohlenwasserstoffharz²⁵ mit dem Zusatz von UV-stabilisierenden Substanzen mittels UVC-Strahlung künstlich gealtert (siehe 4 Materialien und Methoden). Als stabilisierende Additive werden zwei Substanzen unterschiedlicher Wirkmechanismen erprobt, welche zudem in Kombination angewendet werden. Ein UV-Absorber „Tinuvin® 900“ und ein als Radikalfänger wirkendes sterisch gehindertes Amin (HALS) mit dem Produktnamen UV-Stabilisator 292 (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Der Grad der Degradation der einzelnen Probefilme wird mittels makroskopischer und mikroskopischer Betrachtung unter visueller (VIS) und UV-Strahlung, Farb- und Glanzmessungen, und Versuchen zur Löslichkeit evaluiert. Die Auswertung und Interpretation (siehe 5 Ergebnisse und Diskussion der generierten Daten erfolgt auf Grundlage des materialwissenschaftlichen Forschungsstandes (siehe 2 Stand der Forschung und 3 Theoretischer Hintergrund).

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen eine Datengrundlage dafür liefern, ob materialstabilisierende Additive die UV-induzierte Alterung transparenter Möbelüberzüge verringern können. Im Fokus stehen dabei vergleichende Aussagen zu Wirksamkeit und möglichen Wechselwirkungen unter definierten Alterungsbedingungen. Die Befunde sollen als Ansatzpunkte für weiterführende, praxisnähere Untersuchungen dienen.

²³ Vgl. PIENA 2001.

²⁴ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²⁵ Vgl. HORIE 2010, S. 183.

2 Stand der Forschung

Die Stabilisierung transparenter Überzüge gegenüber lichtinduzierter Degradation ist seit langem Gegenstand grundlegender Fragestellungen,^{26 27} mit denen sich insbesondere die Beschichtungsindustrie systematisch auseinandersetzt. Im Zentrum stehen dabei unterschiedliche Substanzklassen und Wirkmechanismen, die seit Jahrzehnten detailliert untersucht und, nicht zuletzt aufgrund der hohen wirtschaftlichen Relevanz und entsprechender Forschungsressourcen, kontinuierlich weiterentwickelt werden.^{28 29} Typische Anwendungsfelder sind die Beschichtung von Substraten mit überwiegend synthetischen polymeren Materialien, etwa in der Automobilindustrie, bei der Beschichtung von Kunststoffen und Holzwerkstoffen.³⁰ Je nach Einsatzgebiet ergeben sich spezifische Anforderungen an Additive, beispielsweise hinsichtlich Transparenz, Langzeitstabilität, Kompatibilität mit dem Bindemittel, Migration oder Einfluss auf Verarbeitung und mechanische Eigenschaften.^{31 32} Dabei kann zum einen die Wirkung zur Stabilisierung des Überzugsmaterial selbst vor photochemischer Alterung gefragt sein, aber auch das Schützen des Substrates unter der Überzugsschicht vor lichtinduzierter Degradation ist eine wichtige Anwendung.³³ Dies betrifft unter anderem Holzoberflächen, bei welchen photochemische Alterungsprozesse zu einer ausgeprägten optischen Veränderung führen können.³⁴ Untersuchungen zur Wirksamkeit UV-stabilisierender Additive in Überzügen mit dem Ziel, solche Substratveränderungen zu reduzieren, sind in der Forschung entsprechend ebenfalls beschrieben. Sie werden an dieser Stelle jedoch lediglich als Kontext erwähnt und im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter vertieft.^{35 36}

Als Schlüsseladditive für die Lichtstabilisierung transparenter Beschichtungen haben sich insbesondere sterisch gehinderten Amine (HALS) seit den 1970er-Jahren etabliert. Ihre Wirksamkeit in zahlreichen Anwendungen gilt als gut belegt, weshalb HALS heute breit eingesetzt werden.³⁷ Seit den frühen 1970er-Jahren ist zudem die Kombination von HALS mit UV-Absorbern verbreitet, da hier synergetische Effekte genutzt werden können, um die stabilisierende und

²⁶ Vgl. VALET/BRAIG 2017.

²⁷ Vgl. BONNET 2025.

²⁸ Vgl. NGUYEN 2023a.

²⁹ Vgl. NGUYEN 2023b.

³⁰ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 49.

³¹ Vgl. BONNET 2025.

³² Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 49.

³³ Vgl. ebd., S. 49ff.

³⁴ Vgl. SCHALLER/ROGEZ 2007.

³⁵ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008.

³⁶ Vgl. SCHALLER/ROGEZ 2007.

³⁷ Vgl. BONNET 2025, S. 121f.

schützende Wirkung zu maximieren. Innerhalb dieser Additivgruppen existieren unterschiedliche Molekülstrukturen und daraus resultierende Eigenschaften, die jeweils für bestimmte Anwendungen und Anforderungen besonders geeignet sind.^{38 39 40}

In den 1980er und 1990er-Jahren fanden diese Fragen auch im Feld der Konservierung und Restaurierung Aufmerksamkeit. Vor allem bezüglich der Stabilisierung von Gemäldefirnismaterialien wurde der Einsatz von Additiven diskutiert. Der Ausgangspunkt dieser Untersuchungen war der verbreitete Einsatz von Naturharzen, insbesondere von Dammar, als Materialien für bei Restaurierungsmaßnahmen aufgetragenen Gemäldefirnissen.^{41 42} Mit der Zeit zeigen diese Naturharzfirnisfilme jedoch unerwünschte charakteristische Eigenschaftsveränderungen wie Gelben, Verlust von Härte und Glanz und Veränderungen des Löslichkeitsverhaltens.⁴³ Zunächst wurde sich mit den ablaufenden Degradationsprozessen hinter den Alterungsphänomenen auseinandergesetzt. Trotz der Komplexität der ablaufenden Alterungsprozessen wird die photochemisch induzierte Autooxidation als vorrangiger Mechanismus der Degradation beschrieben (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse). Um die Firnismaterialien zu stabilisieren, sollte deshalb am Beginn des autooxidativen Reaktionsprozesses angesetzt werden.⁴⁴ Auf Grundlage dieser Erkenntnisse erfolgte eine Auseinandersetzung mit einer Vielzahl an, in der Industrie angewendeten materialstabilisierenden Additiven unter Berücksichtigung der konservatorischen und restauratorischen Anforderungen, insbesondere hinsichtlich der Transparenz und geringen Schichtdicke der Firnisfilme.⁴⁵ Der Einsatz bestimmter Substanzgruppen wie aromatischer Amine, Metallkomplexe oder sterisch gehinderter Phenole wird zur Stabilisierung lichtinduzierter Abbauprozesse unter anderem aufgrund fehlender chemischer Kompatibilität mit Firnismaterialien, Eigenfarbe der Additive, Reaktivität mit (Objekt-) Materialien oder Toxizität kritisch betrachtet.^{46 47 48} Im Gegensatz dazu erscheinen die Gruppen der sterisch gehinderten Amine (HALS) und UV-Absorber aufgrund ihrer Wirkungsmechanismen (siehe 3.2 UV-

³⁸ Vgl. VALET/BRAIG 2017.

³⁹ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009.

⁴⁰ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008.

⁴¹ Vgl. DE LA RIE 1988a, S. 53.

⁴² Vgl. LAFONTAINE 1981, S. 16.

⁴³ Vgl. DE LA RIE 1988a, S. 53.

⁴⁴ Vgl. ebd.

⁴⁵ Vgl. DE LA RIE 1988b.

⁴⁶ Vgl. LAFONTAINE 1981.

⁴⁷ Vgl. DE LA RIE 1988b.

⁴⁸ Vgl. ZUMBÜHL 2011, S. 9.

Stabilisatoren) und unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen an Materialien bei vorliegenden Prozessen als grundsätzlich geeignet.⁴⁹

Daran anknüpfend werden in verschiedenen Publikationen Versuche zu den Möglichkeiten der Stabilisierung von natürlichen als auch synthetischen Firnismaterialien mit HALS und/ oder UV-Absorbern dargelegt.^{50 51 52 53 54} In Versuchsreihen werden naturharzbasierte Firnismaterialien (Dammar und Mastix) mit HALS und/ oder UV-Absorbern verschiedener Konzentrationen versetzt. Filme dieser Probefirnisse werden sowohl künstlich als auch natürlich mittels elektromagnetischer Strahlung im visuellen und ultravioletten Bereich gealtert. Eventuelle Materialveränderungen werden unter anderem mittels Farb- und Glanzmessungen, makroskopischer und mikroskopischer Betrachtung unter VIS und UV-Strahlung, Versuchen zur Löslichkeit, IR-Spektroskopie evaluiert. Dabei zeigt sich, dass die stabilisierende Wirkung der erprobten Additive hinsichtlich UV-induzierter Degradationsprozesse bei der Anwendung in naturharzbasierten Firnissen limitiert ist. Eine Ursache dafür wird in der Komplexität der Zusammensetzung gesehen. Unter Ausschluss der Strahlungsanteile des UV-Spektrums bei der photochemischen Alterung kann jedoch mittels HALS eine beträchtliche Stabilisierung erzielt werden.^{55 56 57} Dieser Effekt konnte zudem in einer Versuchsreihe durch die Kombination mit einem UV-absorbierenden 2-(2-Hydroxyphenyl)-benzotriazol (BTZ) verbessert werden. Eine Erklärung dafür wird in der bereits in anderer Literatur erwähnten stabilisierenden Wirkung von BTZ über die UV-Absorption hinaus als Radikalfänger gesehen.⁵⁸

Des Weiteren erfolgte die Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten der Lichtstabilisierung von synthetischen Firnismaterialien. Diese wurden in der Mitte des 20.Jh. in die Konservierung eingeführt, da sich die Mehrheit dieser für Firnisse eingesetzten synthetischen Harze grundsätzlich alterungsbeständiger als die Naturharzfirnisse ergaben.⁵⁹ In den Untersuchungen werden Vertreter unterschiedlicher Substanzgruppen, unter anderem hydrierte

⁴⁹ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 66.

⁵⁰ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1990b.

⁵¹ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1989, S. 137ff.

⁵² Vgl. DE LA RIE 1993.

⁵³ Vgl. CIABACH 1999.

⁵⁴ Vgl. DE LA RIE/LOMAX/PALMER/MAINES 2002.

⁵⁵ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1989.

⁵⁶ Vgl. O'MALLEY 2010, S. 5.

⁵⁷ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1990b.

⁵⁸ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1989, S. 137ff.

⁵⁹ Vgl. LAFONTAINE 1981, S. 16.

Kohlenwasserstoffharze⁶⁰, nicht hydrierte Kohlenwasserstoffharze⁶¹, Urea-Aldehydharze⁶² und Ketonharze⁶³, betrachtet.^{64 65 66 67} Beim Vergleich der materialimmanenten Stabilität erweisen sich in den Alterungsversuchen die hydrierten Kohlenwasserstoffharze als stabilsten. Mit dem Zusatz von HALS (zumeist das Produkt Tinuvin® 292) lassen sich die überwiegende Mehrheit der in den Versuchen getesteten synthetischen Firnismaterialien ausreichend stabilisieren.^{68 69} Insbesondere das Regalrez® 1094 und 1078 zeigten in den Versuchen sehr gute Ergebnisse bei dem Inhibieren der ablaufenden Degradationsprozesse mittels dem Zusatz von Tinuvin® 292.^{70 71}

Hinsichtlich der Stabilität von UV-Stabilisatoren berichten die Ergebnisse einer Diplomarbeit aus dem Jahr 2004, dass im Rahmen der Untersuchung keine Befunde erhoben wurden, die die Annahme nahelegen, die geprüften UV-Stabilisatoren könnten die Überzugsmaterialität potenziell beeinträchtigen. Als Additive wurden ein UV-Absorber und HALS-Stabilisatoren eingesetzt. Die Proben wurden sowohl thermisch als auch photochemisch durch UVA-Bestrahlung künstlich gealtert. Zur Erfassung möglicher Eigenschaftsveränderungen der Probefilme kam ein breites Methodenspektrum zum Einsatz, darunter Farbwertmessungen, Härtebestimmungen und Untersuchungen zur Trocknungsfähigkeit, Wiederanlösbarkeit und Feuchtebeständigkeit.⁷²

In Bezug auf spezifische Möbelüberzugssysteme fand bislang keine breit angelegte Auseinandersetzung statt, obwohl in beiden Fachbereichen der Konservierung für transparente Überzüge vergleichbare Substanzgruppen mit ähnlichen Einflussfaktoren und Prozessen der Materialalterung Anwendung finden. Einzelne Forschungsprojekte beziehen jedoch im Rahmen konservatorischer Fragestellungen zu Möbelüberzügen lichtstabilisierende Additive ein.

Piena⁷³ befasst sich beispielsweise mit dem Einsatz von dem niedermolekularen hydrierten Kohlenwasserstoffharz Regalrez® in der Möbelkonservierung und diskutiert, welcher

⁶⁰ Regalrez® 1094, Regalrez® 1078, Escorez® 5389, Esscorez® 5389

⁶¹ Arkon® P90

⁶² Laropal® A 81, Laropal® A 101

⁶³ Laropal® K80

⁶⁴ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHY 1990a.

⁶⁵ Vgl. DE LA RIE 1993.

⁶⁶ Vgl. CIABACH 1999.

⁶⁷ Vgl. DE LA RIE/LOMAX/PALMER/MAINES 2002.

⁶⁸ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHY 1990a.

⁶⁹ Bezugnahme auf eine von R.L Feller etablierte Skala zur Lichtbeständigkeit nach dem „Bluewool standard“ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHY 1990b, S. 163.

⁷⁰ Vgl. DE LA RIE 1993.

⁷¹ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHY 1990a.

⁷² Vgl. MATTERN 2004.

⁷³ Vgl. PIENA 2001.

Regalrez®-Typ dafür geeignet ist. Dabei wird die Verwendung eines HALS als grundsätzlich stabilisierend für alle Regalrez®-Typen vorausgesetzt, gestützt auf die in der Literatur für Gemäldefirnis-Anwendungen (insbesondere Regalrez® 1094 und 1078) beschriebenen positiven Effekte. Eine spezifische Untersuchung, die diese Annahme für den, aufgrund der geeigneteren Glasübergangstemperatur⁷⁴ in der Möbelkonservierung relevanten Regalrez®-Typ 1126 verifiziert, liegt dort jedoch nicht vor.

Piccirillo und Kollegen⁷⁵ vergleichen transparente Überzüge auf Basis von Schellack und dem hydrierten Kohlenwasserstoffharz Regalrez® 1126 hinsichtlich deren photochemischen Alterungsverhaltens. Dabei wird Probekörpern unter anderem ein HALS beigefügt und diese werden natürlich und künstlich unter VIS- und UVA-Strahlung gealtert und mittels makroskopischer und mikroskopischer Betrachtung unter UV- und VIS-Strahlung, Farbmessungen und FTIR-Analysen ausgewertet. Aus den Befunden dieser Versuche wird zum einen geschlossen, dass der Regalrez®-Typ 1126, ähnlich wie die als Gemäldefirnisse verwendeten Varianten, mit dem Zusatz von einem HALS gegenüber lichtinduzierter Degradation stabilisiert werden kann. Außerdem wird bei dem Schellack eine Verlangsamung, jedoch keine vollständige Verhinderung der Abbauprozesse beobachtet. Anzumerken ist jedoch, dass die Publikation einige Angaben zur methodischen Durchführung der Versuche, unter anderem zur Probenanzahl oder zu eventuellen Wiederholungen der Messungen, nicht ausführt. Zudem sind einzelne Schlussfolgerungen nicht vollständig nachvollziehbar. Trotzdem lassen sich von diesem Versuch Rückschlüsse hinsichtlich einer positiven Wirksamkeit auf die Materialstabilisierung der erprobten transparenten Möbelüberzügen ableiten.

Aus der Literatur lassen sich somit Tendenzen ableiten, dass materialstabilisierende Additive auch in spezifischen Möbel-Überzugssystemen eine positive Wirkung hinsichtlich der Stabilisierung photochemisch induzierter Degradation entfalten könnten. Gezielte Untersuchungen, die diese Annahme für transparente Möbelüberzüge systematisch prüfen, liegen jedoch bislang nicht vor. Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb damit, ob durch den Zusatz geeigneter materialstabilisierender Additive eine Verbesserung der Beständigkeit von transparenten Möbelüberzügen gegenüber ultravioletter (UV)-Strahlung erzielt werden kann. Ziel sind grundlegende Aussagen, ob und in welchem Umfang die UV-Strahlungsinduzierte Degradation der Materialien verringert werden kann.

⁷⁴ Vgl. ebd., S. 60.

⁷⁵ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

3 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden die primären UV-induzierten Degradationsprozesse der gewählten Überzugssysteme (siehe 4.1.1 Transparente Überzugssysteme) erläutert und die Funktionsweise verschiedener stabilisierender Zusätze betrachtet.

3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse

Die Alterung organischer Materialien beruht auf dem Zusammenspiel verschiedener Prozesse und auslösender Faktoren.⁷⁶ Als eine der wichtigsten Prozesse der Degradation zählen oxidative Reaktionen. Eine wesentliche Form ist die Autooxidation, die unter anderem durch elektromagnetische UV-Strahlung initiiert werden kann.⁷⁷ Dabei handelt es sich um eine durch Absorption von UV-Strahlung initiierte autokatalytisch-oxidative Radikal-Kettenreaktion.^{78 79}

Eine Voraussetzung für die Photooxidation organischer Materialien ist das Vorhandensein sogenannter chromophorer Gruppen.⁸⁰ Dabei handelt es sich um Gruppen, die elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen absorbieren können und dadurch in einen angeregten Zustand überführt werden.⁸¹ Chromophore können funktionelle Gruppen des Materials selbst sein oder als Oxidationsprodukte anderer Prozesse entstehen (z. B. Peroxide bzw. Hydroperoxide oder Carbonylgruppen).⁸² Zudem können ins Material eingebrachte Verunreinigungen zur Absorption von Strahlung beitragen.⁸³

Der zugrunde liegende Mechanismus verläuft typischerweise als radikalische Kettenreaktion in vier Hauptschritten.^{84 85} Der Prozess beginnt im Initiationsschritt mit der Bildung erster freier Radikale (siehe Abb. 1). Diese Radikalbildung kann durch Photolyse, das heißt Bindungsspaltung durch absorbierte Lichtenergie, erfolgen.⁸⁶ Vor allem die energiereiche, kurzwellige UV-C-Strahlung kann zu einer direkten homolytischen Spaltung chemischer Bindungen führen.⁸⁷ Die Art der Bindung die gespalten werden kann, hängt von der jeweiligen Bindungsstärke beziehungsweise erforderlichen Dissoziationsenergie ab.⁸⁸ Bei längerwelliger UV-Strahlung ist

⁷⁶ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 134.

⁷⁷ Vgl. FELLER 1994, S. 187.

⁷⁸ Vgl. ebd., S. 55f.

⁷⁹ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 9f.

⁸⁰ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 21.

⁸¹ Vgl. ebd.

⁸² Vgl. FELLER 1994, S. 55.

⁸³ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 15.

⁸⁴ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

⁸⁵ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 15.

⁸⁶ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

⁸⁷ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

⁸⁸ Vgl. MILLS/SMITH 1990, S. 136.

eine solche direkte Bindungstrennung deutlich seltener.⁸⁹ Hier werden zunächst meist nur die Elektronen in chemischen Bindungen angeregt, ohne dass es unmittelbar zur Spaltung kommt. Freie Radikale entstehen dabei über weitere Spaltungsreaktionen.⁹⁰ Im fortgeschrittenen Verlauf der Autooxidation werden Radikale zunehmend aus den entstehenden (Hydro-)Peroxiden (ROOH) gebildet.⁹¹

Im zweiten Schritt der radikalischen Kettenreaktion, der Propagation, reagieren die gebildeten Alkylradikale ($R\bullet$) sehr schnell mit Sauerstoff zu Peroxyradikalen ($ROO\bullet$).⁹² Diese Peroxyradikale abstrahieren anschließend ein Wasserstoffatom aus benachbarten Molekülen und bilden dabei Hydroperoxide (ROOH). Gleichzeitig entsteht erneut ein Alkylradikal ($R\bullet$).⁹³ Dadurch wird die Kettenreaktion aufrechterhalten. Da die Reaktion von Alkylradikalen mit Sauerstoff besonders schnell abläuft, liegen während des Autooxidationsprozesses vor allem Peroxyradikale als Radikalspezies vor.⁹⁴

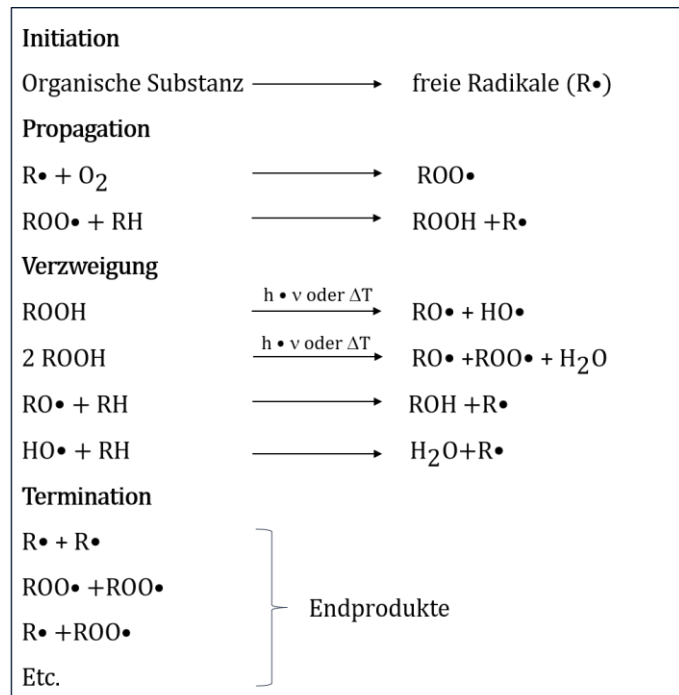


Abbildung 1 Schematischer Mechanismus der photochemischen Oxidation organischer Materialien, nach VALET/BRAIG 2017, MILLS/SMITH 1990, DE LA RIE 1988b

Die gebildeten (Hydro-)Peroxide können unter Einfluss elektromagnetischer Strahlung (oder Wärme) wiederum zerfallen und zusätzliche Radikale erzeugen, insbesondere Peroxy- ($ROO\bullet$) und Alkoxyradikale ($RO\bullet$).⁹⁵

⁸⁹ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

⁹⁰ Vgl. ebd.

⁹¹ Vgl. ebd., S. 187.

⁹² Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

⁹³ Vgl. FELLER 1994, S. 187.

⁹⁴ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

⁹⁵ Vgl. ebd.

Dadurch erhöht sich die Radikalkonzentration und der Alterungsprozess wird beschleunigt.⁹⁶ Die Autoxidation ist somit als autokatalytisch zu beschreiben.⁹⁷ Dieser Prozess führt zur Kettenverzweigung.⁹⁸

Der vierte Schritt ist der Kettenabbruch (Termination): In Abwesenheit von Inhibitoren endet die Reaktionskette durch Reaktion zweier Radikale miteinander, wobei insbesondere die Rekombination von Peroxyradikale ($\text{ROO}\bullet$) eine wichtige Rolle spielen.⁹⁹

Die photochemische Autooxidation organischer Materialien wird von mehreren Faktoren beeinflusst, die sich teilweise gegenseitig verstärken.¹⁰⁰

Ein wichtiger Einflussfaktor ist die Temperatur bei der die Reaktionen ablaufen. Liegt sie oberhalb der Glasübergangstemperatur¹⁰¹ des Materials, können sich entstehende Radikale leichter in diesem bewegen. Das kann dazu führen, dass seltener direkte Rekombinationen stattfinden und Radikale stattdessen häufiger weitere Reaktionen eingehen. Insgesamt kann dadurch die „Ausbeute“ der photochemischen Reaktion steigen.¹⁰²

Ebenso entscheidend ist das Vorhandensein von Sauerstoff. Dabei spielen sowohl bereits im Material vorhandener Sauerstoff als auch der Zutritt von Luftsauerstoff eine Rolle.¹⁰³ Wie gut Sauerstoff in eine Schicht eindringen kann, hängt unter anderem von der Diffusionsfähigkeit, der Schichtdicke und der Materialstruktur ab. Das beeinflusst, ob die Oxidation vorrangig nur an der Oberfläche oder auch tiefer im Material stattfindet.¹⁰⁴

Weiterhin ist die Wellenlänge der Strahlung ein Einflussfaktor auf die Art der ablaufenden Prozesse.^{105 106} Daneben beeinflusst auch die Lichtintensität den Prozess: Bei höherer Intensität werden in der Regel mehr Radikale gebildet, die Initiation steigt also. Der grundlegende Ablauf der Kettenreaktion (Propagation) bleibt jedoch gleich. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist

⁹⁶ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 16f.

⁹⁷ Vgl. HORIE 2010, S. 40.

⁹⁸ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 16f.

⁹⁹ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

¹⁰⁰ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 137.

¹⁰¹ Die **Glasübergangstemperatur** (T_g) ist die Temperatur, bei der ein amorpher oder teilkristalliner Polymeranteil vom spröden Zustand in einen weicheren, gummi-elastischen Zustand übergeht. Es handelt sich dabei um einen temperaturabhängigen Übergangsbereich, der mit einer deutlichen Änderung der Beweglichkeit der Polymerketten und damit der mechanischen Eigenschaften einhergeht. Vgl. HORIE 2010, S. 22.

¹⁰² Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 137.

¹⁰³ Vgl. ebd.

¹⁰⁴ Vgl. ebd.

¹⁰⁵ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

¹⁰⁶ Vgl. MILLS/SMITH 1990, S. 136.

die Abspaltung eines Wasserstoffatoms. Dieser Schritt wird durch die Bestrahlung selbst nicht direkt schneller, sondern vor allem durch die vorhandenen Reaktionspartner begrenzt.¹⁰⁷

Schließlich können auch Abbauprodukte den weiteren Verlauf beeinflussen. Manche Abbauprodukte sind selbst radikalisch oder können neue chromophore Gruppen bilden. Dadurch kann das Material später stärker oder in anderen Wellenlängenbereichen Licht absorbieren, was den Alterungsprozess zusätzlich beschleunigen oder verändern kann.¹⁰⁸

Schellack

Schellack ist als Ausscheidungsprodukt der Lackschildlaus tierischen Ursprungs. Rohrer Schellack (Stocklack) setzt sich aus etwa 70–80 % sogenannten Harzanteil, 4–8 % Farbstoffen und 6–7 % Wachs zusammen. Der Harzanteil besteht überwiegend aus Oligomeren von Sesquiterpenen, die mit (mehrfach) hydroxylierter Fettsäuren verestert sind.¹⁰⁹

Verschiedene in dem natürlichen Harz enthaltene funktionelle Gruppen werden als oxidationsanfällig charakterisiert.^{110–111} So wird zum Beispiel beschrieben, dass enthaltene Aldehydgruppen im Zuge oxidativer Prozesse zu Carbonsäuren umgewandelt werden.^{112–113} Parallel dazu wird eine abnehmende Löslichkeit in Alkohol angenommen, die mit einer Abnahme verfügbarer Hydroxylgruppen und damit verbundenen Strukturänderungen erklärt wird. Als mögliche Ursache wird eine fortschreitende Veresterung diskutiert, die zu Vernetzungen führen kann.¹¹⁴ In experimentellen Untersuchungen wurde bei künstlicher Alterung mittels UVA-Strahlung eine Zunahme von Estergruppen im gealterten Material erkannt, was die Annahme einer UV-induzierten Vernetzung stützt.¹¹⁵ In künstlichen Alterungsversuchen¹¹⁶ und bei natürlicher Alterung zeigte sich, dass die Beständigkeit von Schellackfilmen gegenüber Feuchteeinwirkung abnehmen kann.¹¹⁷ In der Literatur werden teilweise abnehmende Glanzwerte beschrieben, wobei die Messreihen teils eine große Streuung aufweisen.¹¹⁸ Andere Arbeiten berichten hingegen über Glanzwerte, die über längere Zeit vergleichsweise stabil bleiben.¹¹⁹ Bei

¹⁰⁷ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

¹⁰⁸ Vgl. FELLER 1994, S. 61.

¹⁰⁹ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 101.

¹¹⁰ Vgl. HORIE 2010, S. 258f.

¹¹¹ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 102f.

¹¹² Vgl. COELHO/NANABALA/MÉNAGER/COMMEREUC/VERNEY 2012, S. 937.

¹¹³ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 102f.

¹¹⁴ Vgl. ebd.

¹¹⁵ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 78.

¹¹⁶ 300–400 nm, T 40 °C, r. H.-Zyklen (12h) von 40 % bis. 70 %

¹¹⁷ Vgl. ŠIMŮNKOVÁ/PÁNEK/ZEIDLER 2018, S. 10.

¹¹⁸ Vgl. GHOSH/GUPTA/KISHAN KUMAR 2015.

¹¹⁹ Vgl. ŠIMŮNKOVÁ/PÁNEK/ZEIDLER 2018, S. 7.

der künstlichen Alterung mittels UVA-Strahlung werden Farbveränderungen beobachtet und es wird zudem ein zunehmendes UV-Lumineszenzverhalten gealterter Schellackfilme beschrieben.¹²⁰ Das weist auf Modifikationen der molekularen Struktur hin. Schließlich werden als sichtbare Schadensbilder nach UV-Einwirkung auch zunehmende Sprödigkeit und die Ausbildung von Mikrorissen beobachtet und mit der Ausbildung von Quervernetzungen in Verbindung gebracht.^{121 122}

Überzüge auf Basis von Nitrocellulose

Nitrocelluloselacke enthalten als filmbildende Hauptkomponente Nitrocellulose. Nitrocellulose sind nitrierte Celluloseester (auch Nitratester der Cellulose). Der Ausgangsstoff ist Cellulose, ein lineares Polysaccharid aus β -(1 $\rightarrow$ 4)-verknüpften D-Glucoseeinheiten.¹²³ Die reaktiven Hydroxylgruppen (–OH) der Cellulose werden durch konzentrierter Salpetersäure und in der Regel auch Schwefelsäure ganz oder teilweise zu Nitratestern (–ONO₂) umgesetzt.¹²⁴ Für die Anwendung in Lacken wird dabei ein Substitutionsgrad (DS)¹²⁵ von 2,0 bis 2,2 angegeben.¹²⁶ Die Löslichkeit von Cellulosenitraten wird in der Literatur als in Estern und Ketonen sowie in Mischungen aus Estern und Alkoholen beschrieben.¹²⁷

Als Cellulosederivat ist Nitrocellulose photochemisch vergleichsweise empfindlich und kann unter UV-Einfluss oxidativ abgebaut werden.^{128 129} Cellulosenitrat altert bei Raumtemperatur durch die chemischen Prozesse wie Oxidation und Hydrolyse. Säureverunreinigungen wirken dabei katalytisch, wobei Licht den Prozess beschleunigt.¹³⁰ Der in dieser Arbeit untersuchte Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“ enthält neben Nitrocellulose und Lösemitteln auch Additive: Harzkomponenten und Diisononylphthalat als Weichmacher.¹³¹ Die Alterung ist daher nicht monokausal, sondern ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Komponenten. Im Fokus steht jedoch der Nitrocellulose- Anteil.

¹²⁰ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 76f.

¹²¹ Vgl. ŠIMŮNKOVÁ/PÁNEK/ZEIDLER 2018, S. 9.

¹²² Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 78.

¹²³ Vgl. HORIE 2010, S. 214.

¹²⁴ Vgl. SELWITZ 1988, S. 9.

¹²⁵ Als **Substitutionsgrad** (DS) wird die durchschnittliche Anzahl der Hydroxylgruppen, die an jeder Glucoseeinheit der Kette (hier durch Nitratgruppen) substituiert sind bezeichnet. Das Maximum liegt bei 3. Vgl. HORIE 2010, S. 205.

¹²⁶ Vgl. ebd.

¹²⁷ Vgl. SELWITZ 1988, S. 10.

¹²⁸ Vgl. MILLS/SMITH 1990, S. 136.

¹²⁹ Vgl. HORIE 2010, S. 40.

¹³⁰ Vgl. ebd., S. 214.

¹³¹ Vgl. 8 Anhang: 8.4 Abbildung des Gebindes des Nitrocelluloselacks Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

Bei Bestrahlung mit verschiedenen Wellenlängen zeigen sie Farbveränderungen von gelb bis bräunlich.^{132 133} Die ablaufenden Prozesse bei der UV-induzierten Alterung von Nitrocellulosen ist wellenlängenabhängig.¹³⁴

Bei längeren Wellenlängen (sichtbarer Bereich bis UV-A) wird vor allem ein Stickstoffverlust beobachtet, während Viskositäts- und Molmassenänderungen gering ausfallen.¹³⁵ Als zugrunde liegender Mechanismus wird die Photolyse der Nitratestergruppen diskutiert. Dabei werden durch die Absorption von Strahlung Bindungen im Nitratester homolytisch gespalten, was zur Bildung reaktiver Zwischenprodukte führt. Diese Zwischenprodukte können anschließend weitere Folgereaktionen auslösen. Beschrieben werden unter anderem die Reduktion von NO₂ zu NO, was zu oxidativen Folgereaktionen führen kann.¹³⁶ Können die entstehenden Stickoxide frei entweichen (z. B. in einem freien Film) ist das Polymer stabiler.¹³⁷

Bei kürzeren, energiereicheren Wellenlängen dominiert ein Abbauprozess, bei der die Ringstruktur der Celluloseeinheiten angegriffen wird und dies zur Kettenspaltungen führt. Schon der Verlust eines Rings „halbiert“ die Kette im Sinne zweier kürzerer Fragmente, weshalb die Molmasse stark abnimmt und die Viskosität deutlich fällt. Der Stickstoffgehalt im verbleibenden Rückstand bleibt dabei oft weitgehend konstant, da mit den abgetrennten Fragmenten Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff ungefähr im Ausgangsverhältnis entfernt werden. Als Konsequenz sind Veränderungen mechanischer physikalischer Eigenschaften, wie etwa eine erhöhte Sprödigkeit zu erwarten. Durch den Verlust von Weichmachern, wäre eine zusätzliche Verstärkung der Versprödung zu erwarten.¹³⁸

Regalrez® 1126

Regalrez® 1126 ist ein niedermolekulares, hydriertes Kohlenwasserstoffharz. Durch die weitgehende Hydrierung weist es keine funktionellen Carbonyl- oder Hydroxygruppen auf, was mit einer geringen Ausgangspolarität und einer vergleichsweise niedrigen Reaktivität gegenüber klassischen, funktionell gruppengetriebenen Alterungsprozessen einhergeht.¹³⁹ Regalrez® ist in verschiedenen Typen verfügbar, die sich insbesondere in ihrer Erweichungstemperatur unterscheiden, welche in der Typbezeichnung reflektiert wird (Regalrez® 1078: 78 °C; Regalrez®

¹³² Vgl. SELWITZ 1988, S. 22.

¹³³ Vgl. HORIE 2010, S. 214.

¹³⁴ Vgl. SELWITZ 1988, S. 23f.

¹³⁵ Vgl. ebd., S. 23.

¹³⁶ Vgl. BERTHUMEYRIE/COLLIN/BUSSIÈRE/THERIAS 2014, S. 137f.

¹³⁷ Vgl. HORIE 2010, S. 214.

¹³⁸ Vgl. SELWITZ 1988, S. 23f.

¹³⁹ Vgl. PIENA 2001, S. 60.

1094: 94 °C; Regalrez® 1126: 112 °C). Strukturell bestehen die Regalrez®-Typen aus zu 100 % hydrogenierten Oligomeren von Styrol und Styrolderivaten.¹⁴⁰

Untersuchungen zu Alterungserscheinungen beziehen sich in der Literatur vor allem auf Regalrez® 1078 und 1094. Im Vergleich zu anderen Kohlenwasserstoffarten werden diese Typen häufig als relativ stabil gegenüber photochemischer Alterung beschrieben.¹⁴¹ Gleichwohl werden auch bei Regalrez® 1094 und 1078 Alterungserscheinungen beobachtet: So deutet eine Erhöhung der benötigten Lösemittelpolarität zur Entfernung gealterter Filme auf eine Zunahme der Polarität des Materials hin. Dies wird mit der teilweisen Einbindung von Sauerstoff im Zuge oxidativer Prozesse in Verbindung gebracht.¹⁴² In einem anderen Versuch wurde für den Typ Regalrez® 1126 keine Veränderung des Löslichkeitsverhaltens beobachtet, jedoch Oxidationsprodukte mittels FTIR-Analyse gefunden. Das Ergebnis ist jedoch nur eingeschränkt aussagekräftig, da der Versuch im Vergleich zu den zuvor genannten Studien methodisch weniger gut abgesichert war (z. B. hinsichtlich Standardisierung und Reproduzierbarkeit).¹⁴³ Zusätzlich wird in einzelnen Studien eine Zunahme der Molmasse berichtet. Als makroskopisch wahrnehmbare Veränderungen werden eine Tendenz zur Vergilbung¹⁴⁴ und für Regalrez® 1094 eine Versprödung im Alter beschrieben.¹⁴⁵

Anzumerken ist, dass die Art der ablaufenden Alterungsprozesse stark von der Wellenlänge der absorbierten Strahlung abhängt.^{146 147} Bei einer Bestrahlung im UVC-Spektrum (siehe 4.3 Künstliche Alterung der Probekörper) können daher durchaus andere Reaktionswege und Abbauprodukte auftreten als unter UVA- bzw. UVB-Strahlung. Da UVC-Strahlung im natürlichen solaren Spektrum an der Erdoberfläche nicht vorkommt,¹⁴⁸ ist das Alterungsverhalten von Kunst- und Kulturgütern unter UVC-Einwirkung für reale Anwendungsszenarien in der Regel nicht relevant. Entsprechend fehlt auch die Literaturbasis zu möglichen UVC-induzierten Alterungsprozessen.

¹⁴⁰ Vgl. ebd.

¹⁴¹ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1990a.

¹⁴² Vgl. HORIE 2010, S. 187.

¹⁴³ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

¹⁴⁴ Vgl. WEILHAMMER 2001, S. 39.

¹⁴⁵ Vgl. DE LA RIE 1993.

¹⁴⁶ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

¹⁴⁷ Vgl. MILLS/SMITH 1990, S. 136.

¹⁴⁸ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 14.

3.2 UV-Stabilisatoren

Als UV-Stabilisatoren werden im vorliegenden Kontext Substanzen bezeichnet, die einem (organischen) Material zugesetzt werden, um dessen photochemische Degradation zu verlangsamen. Sie können an unterschiedlichen Stellen des Reaktionsprozesses (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse) ansetzen und verfügen, je nach Substanz, über verschiedene Wirkmechanismen.¹⁴⁹

Im Folgenden wird eine Auswahl an verschiedenen Stabilisatoren vorgestellt, wobei näher auf die in dieser Arbeit berücksichtigten Mechanismen (siehe 4.1 Auswahl der zu erprobenden Materialien) eingegangen wird.

UV-Absorber

UV-Absorber wirken, indem sie UV-Strahlung in Konkurrenz zu den Chromophoren des Materials absorbieren und dadurch die im Initiationsschritt photochemischer Abbauprozesse entstehende Radikalbildung reduzieren.^{150 151} Die aufgenommene Strahlungsenergie wird vom Absorber in Schwingungs- bzw. Rotationsenergie (Wärme) umgewandelt.^{152 153} Grundlegend für die Wirksamkeit von UV-Absorbern ist, dass diese Energieumwandlung schneller als eine mögliche Folgereaktion der angeregten Zustände mit dem Substrat erfolgt.¹⁵⁴

Zu den wichtigsten als UV-Absorber fungierende Stoffklassen zählen 2-(2-Hydroxyphenyl)benzotriazole (BTZ), 2-Hydroxybenzophenone (BP), Hydroxyphenyl-s-triazine (HPT) und Oxalanilide.^{155 156} Je nach chemischer Struktur unterscheiden

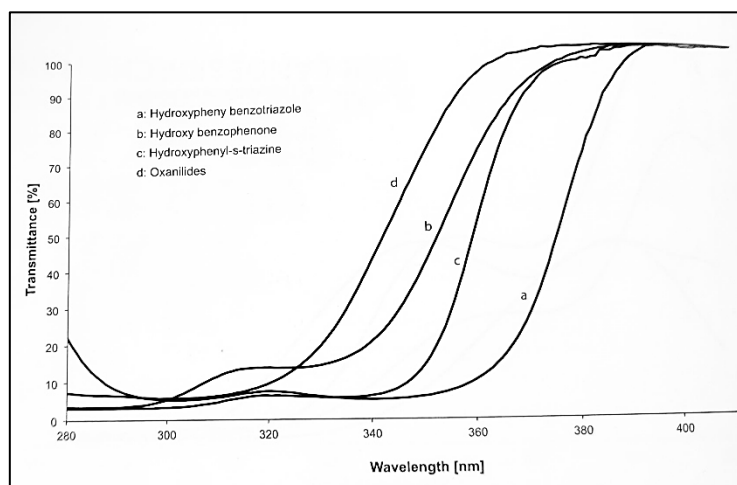


Abbildung 2 Transmissionsspektrum von verschiedenen UV-Absorber-Klassen, $c=10\text{mg/L}$ in Chloroform

sich UV-Absorber in ihren Absorptions- und Transmissionsspektren (siehe Abb. 2), wobei auch

¹⁴⁹ Vgl. ebd., S. 22.

¹⁵⁰ Vgl. GIESSMANN 2010, S. 194f.

¹⁵¹ Vgl. FELLER 1994, S. 55.

¹⁵² Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 22f.

¹⁵³ Vgl. FELLER 1994, S. 55.

¹⁵⁴ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 22f.

¹⁵⁵ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008.

¹⁵⁶ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 24.

innerhalb einer Stoffklasse Variationen von Eigenschaften wie Absorptionsmaxima und -Bandbreiten auftreten.¹⁵⁷

Der Wirkungsmechanismus phenolischer UV-Absorber (BP, BTZ, HPT) basiert wesentlich auf tautomerischen Reaktionsmechanismen¹⁵⁸, die eine rasche Rückkehr in den Grundzustand ohne Strahlungsemission ermöglichen.¹⁵⁹ ¹⁶⁰ Für phenolische UV-Absorber werden zudem synergetische Effekte bei Kombination mit einem geeigneten HALS beschrieben, da beide Additivklassen an unterschiedlichen Stellen des Reaktionsprozess ansetzen.¹⁶¹ Bei Oxalaniliden wird ein intramolekularer Protonentransfer als zentraler Schritt angenommen.¹⁶²

Die Schutzwirkung ist zudem von der Filmdicke abhängig und lässt sich über das Lambert-Beer-Gesetz beschreiben. UV-Absorber schützen so primär das Substrat bzw. darunterliegende Schichten, während das Überzugsmaterial selbst erst in einer gewissen Tiefe wirksam „mitgeschützt“ wird. Die unmittelbare Oberfläche eines Überzugs kann daher nur begrenzt geschützt werden.¹⁶³

Hinsichtlich der photochemischen Stabilität gelten viele UV-Absorber in Anwesenheit von O₂ als relativ resistent gegenüber Photolyse, können jedoch in photooxidative Prozesse involviert sein.¹⁶⁴

¹⁶⁵ In der Literatur wird die Photopermanenz¹⁶⁶ der Substanzgruppen in der Reihenfolge BP $\approx$ Oxalanilide $\ll$ BTZ < HPT angegeben.¹⁶⁷ ¹⁶⁸

Sterisch gehinderte Amine (HALS) als Radikalfänger

Radikalfänger unterbrechen radikalische Kettenreaktionen, indem sie reaktive Radikale deaktivieren und so den Fortlauf der radikalischen Kettenreaktion inhibieren.¹⁶⁹ Photochemisch induzierte Abbaureaktionen spielen hierbei vor allem sterisch gehinderte Amine (HALS; *hindered*

¹⁵⁷ Vgl. ebd.

¹⁵⁸ „Unter Tautomerie (griech. *tauto* = das Gleiche; griech. *meros* = Teil) versteht man das Auftreten zweier verschiedener Verbindungen, wobei sich eine in die andere unter Verschiebung von Bindungen und simultaner Wanderung eines Protons umwandeln können und beide Isomere (Tautomere) miteinander im Gleichgewicht stehen.“ Vgl. WOLLRAB 2014, S. 168.

¹⁵⁹ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 28.

¹⁶⁰ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 36f.

¹⁶¹ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 30.

¹⁶² Vgl. ebd.

¹⁶³ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009, S. 81.

¹⁶⁴ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 128f.

¹⁶⁵ Vgl. BONNET 2009, S. 124.

¹⁶⁶ Die Photopermanenz beschreibt wie viel Verlust des Stabilisators bei Strahlungseinwirkung zu vermerken ist. Je geringer der Verlust, desto größer die Permanenz. Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27f.

¹⁶⁷ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 137.

¹⁶⁸ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 26f.

¹⁶⁹ Vgl. BONNET 2025, S. 119.

amine light stabilizers) eine zentrale Rolle.¹⁷⁰ Chemisch handelt es sich meist um Derivate von 2,2,6,6-Tetramethylpiperidinen.¹⁷¹

Ihre Wirkungsweise wird häufig über den sogenannten Denisov-Zyklus beschrieben (siehe Abb.3): In Gegenwart von Sauerstoff und Strahlung wird die HALS-Ausgangsverbindung (1) zunächst in ein entsprechendes Nitroxylradikal (2) als eigentliche reaktive

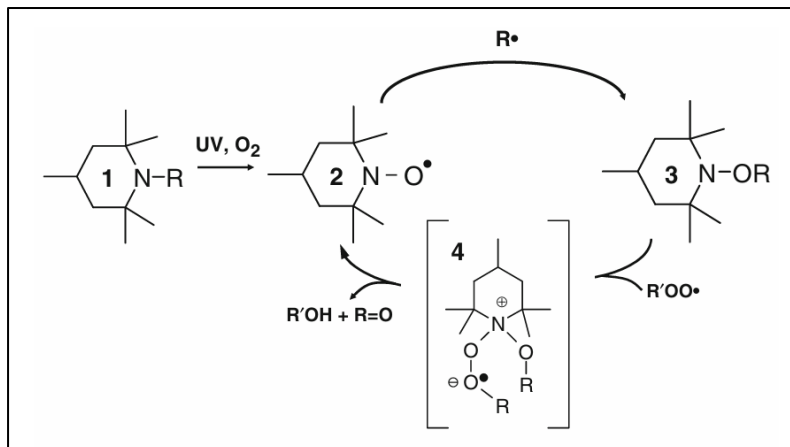


Abbildung 3 Reaktionsmechanismus von sterisch gehinderten Aminen (HALS) nach dem Denisov-Zyklus

Spezies überführt. Dieses fängt anschließend freie Radikale unter Bildung einer Aminoether-Funktion (3) ab. Diese Zwischenstufe (3) interagiert weiter mit Peroxidradikalen und führt über Bildung von Zwischenstufen schließlich zu vergleichsweise harmlosen Alkohol- und Ketonstrukturen. Dabei wird das Nitroxylradikal (2) wieder regeneriert.^{172 173} Ein wesentlicher Vorteil von HALS ist, dass sie im Wirkprozess nicht verbraucht werden und daher einen langfristigen Schutz von Überzugsschichten ermöglichen. Es existieren HALS mit basischem, saurem oder neutralem Charakter.¹⁷⁴ Basische HALS können mit sauren Gruppen im Material wechselwirken.¹⁷⁵ Insgesamt wird für viele HALS eine gute Langzeitstabilität berichtet, die sich durch synergetische Effekte bei der Kombination mit UV-Absorbern weiter verbessern lässt.¹⁷⁶

Antioxidantien als Radikalfänger

Antioxidantien stellen neben den HALS eine zweite wichtige Gruppe radikalfangender Zusätze dar. Dabei wird zwischen primären und sekundären Antioxidantien unterschieden. Primäre Antioxidantien wirken, indem sie reaktive Radikale direkt abfangen und dadurch die radikalische Kettenreaktion unterbrechen. Sekundäre Antioxidantien reagieren hingegen vorwiegend mit (Hydro-) Peroxiden und bauen diese über einen ionischen Mechanismus ab.¹⁷⁷ Sie werden daher

¹⁷⁰ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 15.

¹⁷¹ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009, S. 81.

¹⁷² Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 42f.

¹⁷³ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009, S. 81f.

¹⁷⁴ Vgl. ebd., S. 83f.

¹⁷⁵ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 15.

¹⁷⁶ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 137f.

¹⁷⁷ Vgl. ebd.

auch als Peroxidzersetzer bezeichnet. Antioxidantien werden in der Praxis vor allem zur Stabilisierung gegen thermisch induzierte Oxidationsprozesse eingesetzt. Für Anwendungen unter Lichteinwirkung ist ihre Eignung jedoch eingeschränkt zu beurteilen, da einzelne Antioxidantien nur eine begrenzte Lichtstabilität aufweisen und unter UV-Belastung selbst abbauen können.¹⁷⁸

UV-Quencher

UV-Quencher¹⁷⁹ stabilisieren Materialien, indem sie die Energie angeregter Chromophore übernehmen und diese anschließend unschädlich in Form von Wärme oder als Lumineszenzerscheinung abführen.¹⁸⁰ Im Unterschied zu UV-Absorbern hängt ihre Wirksamkeit dabei weniger von der Filmdicke ab, da nicht die Abschwächung der einfallenden UV-Strahlung im Vordergrund steht, sondern die Deaktivierung angeregter Zustände im Material.¹⁸¹ Als besonders wirksam werden in der Literatur Nickel-Komplexverbindungen beschrieben. Für transparente Überzugssysteme sind sie jedoch eher ungeeignet, da sie eine gelblich-grüne Eigenfarbe aufweisen und eine begrenzte Löslichkeit besitzen. Zudem werden Nickel-Quencher aufgrund ökologischer Aspekte kritisch bewertet werden.¹⁸²

¹⁷⁸ Vgl. BONNET 2025, S. 117.

¹⁷⁹ engl.: to quench = abschrecken, löschen Vgl. ebd., S. 125.

¹⁸⁰ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 45.

¹⁸¹ Vgl. ebd., S. 45f.

¹⁸² Vgl. BONNET 2025, S. 125.

4 Materialien und Methoden

Im folgenden Kapitel wird die Auswahl der in dem Versuchen verwendeten Materialien begründet und die Herstellung sowie das Vorgehen zur künstlichen Alterung der Probekörper dargelegt. Außerdem werden die Methoden zur Evaluierung im Zuge der künstlichen Alterung auftretender Eigenschaftsveränderungen erläutert.

4.1 Auswahl der zu erprobenden Materialien

Die Auswahl der im Rahmen dieser Arbeit erprobten Materialien wird im Folgenden begründet und es werden die Produkte kurz charakterisiert. Die in diesem Kapitel eingeführten Produktnamen der gewählten Materialien werden zur Vereinfachung auch im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet.

4.1.1 Transparente Überzugssysteme

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine erste Einschätzung der Wirksamkeit von UV-stabilisierenden Zusätzen in der Anwendung in transparenten Überzugsmaterialien, wie sie an Möbeln anzutreffen sind beziehungsweise in der Konservierung und Restaurierung eingesetzt werden. Die Auswahl der Überzüge wird daher so getroffen, dass sie eine Bandbreite unterschiedlicher Substanzklassen und damit verbundener Materialeigenschaften wie z.B. Löslichkeitsbereiche abdecken. Darüber hinaus wird eine Variation in der in der Literatur beschriebenen (photo-) chemischen Stabilität berücksichtigt, um potenzielle Unterschiede im Alterungsverhalten und in der Wirkung der UV-Stabilisatoren vergleichend erfassen zu können.¹⁸³ Die Auswahl stützt sich zudem auf die für den Möbelbereich relevante historische Anwendung und auf die Relevanz der Materialien in konservatorisch-restauratorischen Maßnahmen.

Schellack

In dem Kapitel 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse sind die chemische Zusammensetzung und die Alterungsprozesse von Schellack aufgeführt. Zur Herstellung der üblichen Handelsformen wird der Rohstoff in mehreren Verarbeitungsschritten aufbereitet. Dabei werden unter anderem Anteile des Farbstoffes (Lac Dye) entfernt. Zum Teil erfolgt zusätzlich eine Bleichung, zum Beispiel mittels Chlorhaltiger Bleichmittel.^{184 185}

Wurde das Harz historisch zunächst maximal als Zusatz und Beimischung verwendet, fand die reine Schellackpolitur als Oberflächenveredelung von Möbeln seit dem 19. Jahrhundert breite

¹⁸³ Vgl. HORIE 2010.

¹⁸⁴ Vgl. ebd., S. 258.

¹⁸⁵ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 101f.

Anwendung und ist demzufolge als original gewähltes Überzugsmaterial auf verschiedenen Möbelstücken zu erwarten und aufzufinden.¹⁸⁶ Zudem findet Schellack bereits länger eine breite Anwendung im Feld der Konservierung und Restaurierung und ist entsprechend nicht nur als ursprünglicher Überzug, sondern häufig auch als im Rahmen früherer konservatorisch-restauratorischer Maßnahmen eingebrachtes Material auf Objekten nachweisbar.^{187 188} Auch heute wird Schellack in der Restaurierungspraxis weiterhin häufig eingesetzt, da er aufgrund seiner Eigenschaften als praktikables Überzugsmaterial gilt.¹⁸⁹ Schellack bildet vergleichsweise harte Filme und zeichnet sich durch gute Verarbeitbarkeit aus.¹⁹⁰ Hinsichtlich der Reversibilität ist relevant, dass Schellacküberzüge in der Regel sehr gut in polaren Lösemitteln, insbesondere Ethanol, löslich und auch gealtert grundsätzlich wieder anlösbar sind,¹⁹¹ wenngleich Alterungsprozesse zu einer gewissen Abnahme beziehungsweise Veränderung der Löslichkeit führen können.¹⁹²

Vor dem Hintergrund der Anfälligkeit bezüglich photochemischer Degradation (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse) und der zugleich geringen Forschungslage zu Stabilisierungsmöglichkeiten von transparenten Überzugsfilmen auf Basis von Schellack im konservatorischen Kontext, bei gleichzeitig vorhandenen Hinweisen auf eine potenziell positive Wirksamkeit (siehe 2 Stand der Forschung), wird Schellack als Medium im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Für den Versuch wird ein Schellack verwendet, der klassischerweise in Feststoffform als Blätterschellack bezogen wird (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Aufgrund der großen Oberfläche lässt sich dieser im Vergleich mit anderen Handels-Formen schnell in Ethanol lösen. Zugleich kann die Konzentration der Ansatzlösung über das eingesetzte Lösemittelvolumen definiert und reproduzierbar eingestellt werden. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Additivkonzentrationen relevant, da diese auf den Feststoffgehalt in der der Lösung bezogen sind (siehe 4.2 Herstellung der Probekörper).

¹⁸⁶ Vgl. WALCH/KOLLER 1997, S202, 218f.

¹⁸⁷ Vgl. HORIE 2010, S. 259.

¹⁸⁸ Vgl. WALCH/KOLLER 1997, S202, 218f.

¹⁸⁹ PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 73.

¹⁹⁰ Vgl. HORIE 2010, S. 258.

¹⁹¹ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 102f.

¹⁹² Vgl. ebd.

Regalrez® 1126

Regalrez®-Harze sind niedermolekulare, vollständig hydrierte Kohlenwasserstoffharze und damit thermoplastische Polymerisate.^{193 194} Sie sind in verschiedenen Typen erhältlich: u. a. Regalrez® 1078, Regalrez® 1094, Regalrez® 1126. Dabei kennzeichnet die erste Ziffer „1“ die 100 %ige Hydrierung, während die letzten drei Ziffern die Erweichungstemperatur angeben.¹⁹⁵ Strukturell bestehen die Regalrez-Typen aus zu 100 % hydrogenierten Oligomeren von Styrol und Styrolderivaten.¹⁹⁶

In der Konservierung/ Restaurierung wurden niedermolekulare Kohlenwasserstoffharze in den 1990er Jahren durch René de la Rie als alternative Gemäldefirnismaterialien eingeführt.^{197 198} Im Holzobjektbereich sind Regalrez®-Harze zwar bekannt, jedoch nicht flächendeckend etabliert. Aufgrund der höheren Glasübergangstemperatur¹⁹⁹ von 65 °C wird hier der Typus 1126 gegenüber dem als Firnismaterial verwendeten Regalrez® 1094 ($t_g = 33$ °C) als geeigneter beschrieben.²⁰⁰ In der Praxis wird Regalrez® 1126 an Holzobjekten sowohl als Festigungsmaterial für degradierte Überzugsfilme als auch als eigenständige Überzugsschicht eingesetzt.^{201 202} Die resultierenden Filme weisen einen hohen Glanzgrad auf. Die gute Löslichkeit von Regalrez®-Harzen in aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen ermöglicht die Kombination mit polar löslichen Überzugssystemen, etwa als Trennschicht in einem mehrschichtigen Aufbau.²⁰³

Regalrez®-Harze werden grundsätzlich als mit Wachsen mischbar beschrieben. Bei der Anwendung auf Möbeloberflächen ist jedoch zu berücksichtigen, dass beim Auftrag lösemittelhaltiger Wachspasten auf reine Regalrez®-Filme diese anlösen.²⁰⁴

In der Literatur werden Regalrez®-Harze als vergleichsweise stabil beschrieben. Das Alterungsverhalten dieser Harze wird in Kapitel 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse

¹⁹³ Vgl. HORIE 2010.

¹⁹⁴ Vgl. MATTERN 2004, S. 18.

¹⁹⁵ Vgl. PIENA 2001, S. 60.

¹⁹⁶ Vgl. ebd.

¹⁹⁷ Vgl. DE LA RIE 1999.

¹⁹⁸ Vgl. PIENA 2001, S. 61.

¹⁹⁹ Die **Glasübergangstemperatur** (T_g) ist die Temperatur, bei der ein amorpher oder teilkristalliner Polymeranteil vom spröden Zustand in einen weicheren, gummi-elastischen Zustand übergeht. Es handelt sich dabei um einen temperaturabhängigen Übergangsbereich, der mit einer deutlichen Änderung der Beweglichkeit der Polymerketten und damit der mechanischen Eigenschaften einhergeht. Vgl. HORIE 2010, S. 22f.

²⁰⁰ Vgl. PIENA 2001, S. 60.

²⁰¹ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 73.

²⁰² Vgl. PIENA 2001, S. 66.

²⁰³ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 80f.

²⁰⁴ Vgl. PIENA 2001, S. 67.

dargelegt. Für verschiedene Regalrez®-Typen ist zudem die Möglichkeiten der Stabilisierung gegen UV-indizierter Degradation durch den Zusatz von Additiven dokumentiert: beispielsweise die Typen Regalrez® 1094 und Regalrez® 1126 in Kombination mit dem HALS Tinuvin® 292.^{205 206 207}

Regalrez® 1126 kann in Feststoffform oder bereits in Lösung gebracht bezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Regalrez® 1126 in Graupenform bezogen (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Vorteilhaft ist hierbei, dass die Konzentration der Ansatzlösung über das eingesetzte Lösemittelvolumen definiert und reproduzierbar eingestellt werden kann. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Additivkonzentrationen relevant, da diese auf den Feststoffgehalt in der der Lösung bezogen sind (siehe 4.2 Herstellung der Probekörper).

Für die Verarbeitung werden Konzentrationen von 20–40 % Feststoff in einem geeigneten unpolaren Lösemittel empfohlen.²⁰⁸

Nitrocelluloselack

Bezüglich den chemischen Grundlagen und dem Alterungsverhalten von Nitrocelluloselacken ist an dieser Stelle auf Kapitel 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse zu verweisen. Der in dieser Arbeit untersuchte Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“ (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) enthält neben Nitrocellulose und organischen Lösemitteln²⁰⁹ Zusätze: Harzkomponenten und Diisononylphthalat als Weichmacher. Dieses konkrete Produkt wird aus ökonomischen Gründen eingesetzt, da es sich um ein handelsübliches Produkt handelt und bereits an der Hochschule vorhanden ist.

Seit 1920 können Nitrocelluloselacke industriell hergestellt werden.²¹⁰ Nitrocelluloseüberzüge stellen im Möbelbereich historisch wie auch bis heute eine relevante Materialgruppe dar und können an Holzobjekten sowohl als originaler Überzug als auch als Ergebnis früherer Überarbeitungen anzutreffen sein.²¹¹ Allgemein gelten Cellulosenitrate als photochemisch vergleichsweise empfindlich und können unter UV-Einfluss oxidativ abgebaut werden (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse).²¹² Aufgrund dieser Empfindlichkeit eignet sich Nitrocelluloselack als Referenzmaterial, an dem die Wirksamkeit von Stabilisierungsmaßnahmen

²⁰⁵ Vgl. DE LA RIE 1993.

²⁰⁶ Vgl. PIENA 2001.

²⁰⁷ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²⁰⁸ Vgl. PIENA 2001, S. 66.

²⁰⁹ Ein Gemisch aus n-Butylacetat, Isopropanol, 1-Methoxy-2-propanol, Xylol, Dipropylenglykolmethylether und Ethylbenzol siehe 8 Anhang: 8.4 Abbildung des Gebindes des Nitrocelluloselacks Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

²¹⁰ Vgl. WALCH/KOLLER 1997, S. 207.

²¹¹ Vgl. ebd.

²¹² Vgl. SELWITZ 1988, S. 22.

unter beschleunigter Alterung besonders deutlich überprüft werden kann. Zugleich trägt diese Wahl dazu bei, die Bandbreite hinsichtlich Löslichkeitsbereich und Substanzklassen abzudecken.

4.1.2 UV-stabilisierende Zusätze

Die Auswahl der zu erprobenden UV-Stabilisatoren wird auf Grundlage zuvor definierter Anforderungen, hinsichtlich der zu erwartenden Wirkungsweise und konservatorisch/restauratorischer Grundsätze, getroffen. Im Folgenden werden diese Anforderungen zunächst erläutert und im weiteren Verlauf die Auswahl der konkreten Produkte begründet.

Die grundsätzliche Anforderung an anzuwendende UV-Stabilisatoren ist eine Wirksamkeit bei der Inhibierung photochemisch induzierter Abbauprozessen.²¹³ Im Fokus steht im Rahmen dieser Arbeit insbesondere eine UV-induzierte autokatalytisch-oxidative Radikal-Kettenreaktion (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse). Gleichzeitig müssen die Substanzen selbst eine gute photochemische Stabilität aufweisen, da ansonsten die Schutzwirkung mit fortschreitender Bestrahlung verloren geht und durch unerwünschte Abbauprodukte ein eventuelles Schädigungspotential entsteht.²¹⁴ Damit die Schutzwirkung langfristig erhalten bleiben kann, ist zudem ein möglichst dauerhafter Verbleib der Zusätze im Überzug erforderlich. Daraus folgt die Anforderung einer geringen Flüchtigkeit, d. h. eines niedrigen Dampfdrucks. Empfohlen wird in der Literatur deshalb der Einsatz von stabilisierenden Substanzen mit vergleichsweise höheren Molekülmassen.²¹⁵ Um unerwünschte Wechselwirkungen mit dem Überzugsmaterial zu vermeiden, ist eine gute chemische Kompatibilität erforderlich. Bei unzureichender Kompatibilität könnten die stabilisierenden Zusätze zudem migrieren.^{216 217} Des Weiteren ist das Löslichkeitsverhalten ein wichtiger Faktor, da die stabilisierenden Zusätze nur bei ausreichender Löslichkeit in einem für das Überzugssystem geeignete Lösemittel gleichmäßig in dieses eingebracht werden können.²¹⁸ Da die verwendeten Überzugssysteme (siehe 4.1 Auswahl der zu erprobenden Materialien) als transparente Filme aufrocknen, dürfen die Zusätze keine störende Eigenfärbigkeit besitzen. Sie sollen die optischen Ausgangseigenschaften, insbesondere Farbe und Transparenz, nicht relevant verändern. Eine extreme thermische Stabilität²¹⁹ ist im Bereich

²¹³ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 22.

²¹⁴ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27.

²¹⁵ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 16.

²¹⁶ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 56.

²¹⁷ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27.

²¹⁸ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 56.

²¹⁹ Vgl. ebd.

Kunst- und Kulturgut nicht zwingend erforderlich. Eine grundlegende Beständigkeit unter den zu erwartenden Bedingungen (Herstellung, Trocknung, Gebrauch) ist jedoch vorauszusetzen.

Einige Stoffklassen, die prinzipiell an bestimmten Stellen des Alterungsprozesses eingreifen und damit eine stabilisierende Wirkung entfalten können (siehe 3.2 UV-Stabilisatoren), werden auf Grundlage der genannten Anforderungen für die vorliegende Anwendung als ungeeignet eingestuft. Etwa genügen Antioxidantien aufgrund ihrer meist unzureichenden Lichtstabilität nicht den vorher definierten Ansprüchen.²²⁰ UV-absorbierende Pigmente sind für den Einsatz in transparenten Überzügen ebenfalls nicht geeignet, da sie die optischen Eigenschaften durch Eigenfärbigkeit und Streuung sichtbar verändern.²²¹ Gleiches gilt für Nickel-Quencher: Neben ihrer Färbung ist ihre Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit kritisch zu bewerten, sodass sie für die hier betrachtete Anwendung nicht weiter berücksichtigt werden.²²²

Für die Anwendung im vorliegenden Kontext sind insbesondere phenolische UV-Absorber (UV-A) und sterisch gehinderte Amine (HALS) geeignet. Beide Stoffklassen greifen in die relevanten Abbauprozesse ein und gelten zugleich als vergleichsweise photochemisch stabil, sodass ihre Schutzwirkung unter Lichteinwirkung nicht kurzfristig verloren geht.^{223 224} Zudem weisen sie in der Regel keine bis nur geringe Eigenfärbung auf und sind damit grundsätzlich mit transparenten Überzügen vereinbar.²²⁵ Aufgrund der großen Bandbreite verfügbarer Substanzen innerhalb beider Klassen ist außerdem davon auszugehen, dass sich hinsichtlich Polarität und Löslichkeitsverhalten geeignete Materialien für unterschiedliche Überzugssysteme identifizieren lassen.^{226 227} Darüber hinaus sind mögliche synergistische Effekte zwischen UV-Absorbern und HALS von Interesse und sollen mitbetrachtet werden. Gemeint ist damit, dass UV-Absorber die einfallende UV-Strahlung reduzieren, während HALS die photooxidativen Radikalkettenreaktionen hemmen. In Kombination kann dies zu einer höheren Stabilisierung führen als bei Einzelanwendung.²²⁸ Beide Klassen werden bei ihrer Wirkung zudem nicht in stöchiometrischem Sinne verbraucht, weshalb grundsätzlich eine langfristige Wirksamkeit zu erwarten ist.²²⁹ Ein weiterer Aspekt ist, dass insbesondere HALS im konservatorisch-

²²⁰ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 16.

²²¹ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 22.

²²² Vgl. BONNET 2025, S. 125.

²²³ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 25.

²²⁴ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 17.

²²⁵ Vgl. VALET/BRAIG 2017.

²²⁶ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009.

²²⁷ Vgl. VALET/BRAIG 2017.

²²⁸ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008.

²²⁹ Vgl. VALET/BRAIG 2017.

restauratorischen Kontext bereits diskutiert und tendenziell positiv bewertet wird (siehe 2 Stand der Forschung).^{230 231 232}

Tinuvin® 900- UV-Absorber

Bei der Auswahl der phenolischen UV-Absorber werden nur 2-(2-Hydroxyphenyl)-benzotriazole (BTZ) und Hydroxyphenyl-s-triazine (HPT) einbezogen. Benzophenone (BP) werden für die vorliegende Arbeit ausgeschlossen, da sie im Vergleich mit den ausgewählten Stoffen eine geringere photochemische Stabilität aufweisen. Zudem decken sie ein geringeres UV-Spektrum bei der Absorption ab.²³³

BTZ zählen seit den 1980er-Jahren zu den etablierten UV-Absorbern für transparente Beschichtungssysteme.²³⁴

Charakteristisch sind zwei Absorptionsmaxima im Bereich um ca. 300 nm und 350 nm. HPT werden hingegen häufig als besonders leistungsfähig im kurzwelligen UV-Bereich beschrieben. Auch sie zeigen zwei Maxima, typischerweise ein ausgeprägtes Maximum um etwa 300 nm und ein schwächeres im Bereich um ca. 340 nm. Neben der spektralen Abdeckung sprechen die im Vergleich mit BTZ bessere Photostabilität von HPT für deren Verwendung.²³⁵ Zudem werden HPT als chemisch sehr resistent beschrieben, unter anderem gegenüber starken Alkalien und gegenüber Metallen. Bei BTZ wird demgegenüber von möglichen chemischen Reaktionen und komplexierenden Wechselwirkungen mit bestimmten Aminen oder Metallionen berichtet, die mit Vergilbung einhergehen können.²³⁶

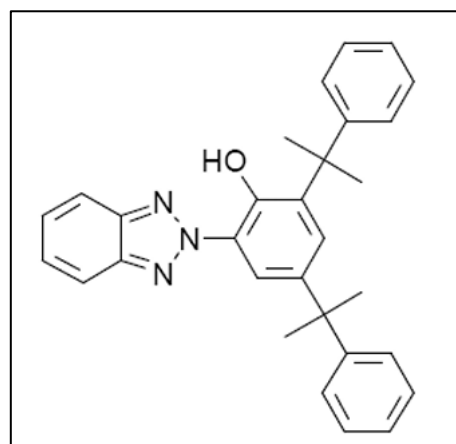


Abbildung 4 Strukturformel des UV-A
Tinuvin® 900

Da ein entsprechender HPT im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht beschafft werden kann, wird auf einen bereits an der Hochschule verfügbaren UV-Absorber zurückgegriffen. Unter rein fachlichen Gesichtspunkten wäre jedoch der Einsatz eines geeigneten, mit dem jeweiligen Überzugssystem kompatiblen HPT zu bevorzugen gewesen.

²³⁰ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²³¹ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1990b.

²³² Vgl. DE LA RIE 1993.

²³³ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 26.

²³⁴ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009, S. 81.

²³⁵ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27.

²³⁶ Vgl. ebd.

Eingesetzt wird Tinuvin® 900 ein Produkt von BASF (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Ein BTZ-Typ mit der Bezeichnung 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-bis(1-methyl-1-phenylethyl)phenol (siehe Abb. 4). Das Produkt liegt als leicht gelbliches Pulver vor und weist gemäß Herstellerangaben nur ein begrenztes Löslichkeitsspektrum auf.^{237 238} Es besitzt Absorptionsmaxima bei etwa 305 nm und 350 nm.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass Benzotriazole in bestimmten Substraten (z. B. Polyolefinen) rasch abgebaut werden können, insbesondere wenn oxidative Abbauprodukte wie Ketone vorliegen.²³⁹ Daraus ergibt sich eine besondere Relevanz für Systeme mit hohem Carbonylanteil, insbesondere Überzüge, die entsprechenden funktionellen Gruppen bereits im frischen Zustand aufweisen. In Versuchen wurde ein beschleunigter Abbauprozess eines BTZ in Dammar und Ketonharzen beobachtet.²⁴⁰

UV-Stabilisator 292 - HALS

Bei der Wahl eines geeigneten HALS standen zum einen die Beschaffbarkeit und zum anderen der Stand der Forschung im Vordergrund: Tinuvin® 292 wird in einer Vielzahl der für diese Arbeit relevanten Literatur eingesetzt und dabei überwiegend mit positiven Tendenzen hinsichtlich der Stabilisierung photochemischer Degradationsprozesse beschrieben (siehe 2 Stand der Forschung).^{241 242 243 244} Darüber hinaus wird Tinuvin® 292 als kombinierbar mit dem im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten UV-Absorber Tinuvin® 900 benannt.²⁴⁵

Das Produkt Tinuvin® 292 kann im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht direkt über den Hersteller bezogen werden. Daher wird das Additiv über den Händler Kremer Pigmente GmbH, unter der Produktbezeichnung UV-Stabilisator 292 HALS bezogen (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Zur Sicherstellung der stofflichen Identität erfolgte ein Abgleich der

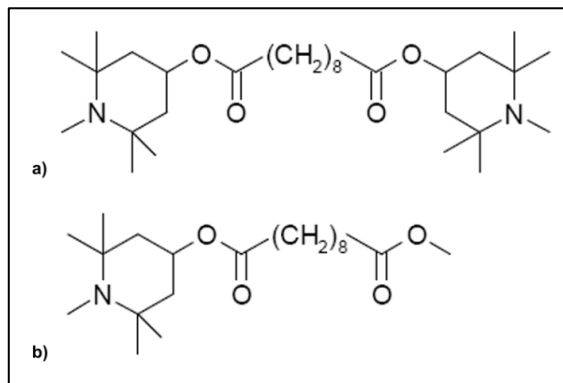


Abbildung 5 Strukturformeln der HALS im Tinuvin® 292

angegebenen Strukturformeln und CAS-Nummer. Diese weisen auf eine mit Tinuvin® 292 (BASF)

²³⁷ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 16.

²³⁸ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter

²³⁹ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 15.

²⁴⁰ Vgl. ebd.

²⁴¹ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²⁴² Vgl. PIENA 2001.

²⁴³ Vgl. CIABACH 1999.

²⁴⁴ Vgl. DE LA RIE 1993.

²⁴⁵ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter

übereinstimmende chemische Struktur hin.^{246 247} Chemisch handelt es sich dabei um eine Mischung aus zwei sterisch gehinderten Aminen, namentlich a) Bis(1,2,2,6,6-pentamethyl-4-piperidyl)sebacat b) Methyl-1,2,2,6,6-pentamethyl-4- piperidylsebacat (siehe Abb. 5).²⁴⁸ Das Produkt liegt in flüssiger, leicht viskoser, transparenter Form vor und wird als mit verschiedenen organischen Lösemitteln mischbar beschrieben. Der pH-Wert ist leicht basisch (pH 8,4 bei 1 % (m/m), 20–25 °C).²⁴⁹

4.2 Herstellung der Probekörper

Als grundsätzlicher Aufbau ist ein getrockneter Überzugsfilm auf einen Trägermaterial zu wählen. Dies entspricht der tatsächlichen Anwendung von Überzugssystemen und ermöglicht praxisnahe Ergebnisse. Aus der Fragestellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt und der beabsichtigten Evaluationsmethoden (siehe 4.4 Evaluationsmethoden) können verschiedene Anforderungen an die anzufertigenden Probekörper abgeleitet werden. Da die Möglichkeit der Stabilisierung der Überzugsmaterialien unabhängig von dem Substrat betrachtet wird, sollte der Probenuntergrund chemisch inert und beständig gegen UV-induzierte Eigenschaftsveränderungen sein. Dadurch werden untergrundbedingte Einflüsse auf die Ergebnisse minimiert, sodass beobachtete Veränderungen eindeutig dem Überzugsmaterial selbst zugeordnet werden können. Da die Stärke der Wirkung von UV-Absorbern abhängig von der Stärke des Überzugsfilmes ist (siehe 3.2 UV-Stabilisatoren) sollten alle Proben eines Überzugssystems gleichmäßige Filme mit möglichst gleichen Schichtstärke aufweisen.²⁵⁰ Dies ist außerdem für eine belastbare Evaluierung und die Vergleichbarkeit der Messdaten Voraussetzung. Insbesondere die Farbe transparenter Überzüge ist abhängig von der Schichtdicke und auch der Glanz sowie Werte der Härtemessungen werden von Gleichmäßigkeit der Oberfläche und Schichtdicke beeinflusst. Für die Durchführung der Farb- und Glanzmessungen wird eine Mindestgröße der Messflächen von 11 x 11 mm beziehungsweise 6,0 x 12,0 mm²⁵¹ benötigt. Zudem ist sicherzustellen, dass die Proben transportfähig sind. Dies ist hinsichtlich der Probendimensionen und Stabilität zu beachten.

In Anlehnung an vergleichbare Untersuchungen^{252 253} werden Glasobjektträger²⁵⁴ als Probenuntergrund verwendet. Zum einen ist Glas ein gegenüber chemischen Interaktionen sehr

²⁴⁶ Vgl. KREMER PIGMENTE GMBH.

²⁴⁷ Vgl. BASF CORPORATION 2019a.

²⁴⁸ Vgl. BASF CORPORATION 2019b.

²⁴⁹ Siehe 8 Anhang Datenblatt UV Stabilisator 292 HALS

²⁵⁰ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009, S. 81.

²⁵¹ Vgl. RHOPPOINT INSTRUMENTS GMBH 2023.

²⁵² Vgl. MATTERN 2004.

²⁵³ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²⁵⁴ Maße 76 x 26 x 1 mm, aus Kalk-Natron-Glas (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis)

stabiles Material und stabil gegenüber UV-Strahlung.²⁵⁵ Zum anderen ist auf Grundlage der bereits erwähnten Literatur^{256 257} anzunehmen, dass die Überzugsfilme ausreichend Haftung auf dem Glas ausbilden. Außerdem werden die Anforderungen hinsichtlich der Probengeometrie und Stabilität erfüllt. Die Transparenz der Glasobjektträger ermöglicht zudem eine Betrachtung der Filme im Durchlicht. Dadurch können Aussagen über eventuelle Veränderungen der inneren Struktur, zum Beispiel das Entstehen von Rissen oder Bläschen, mittels optischer Betrachtung unter Vergrößerung getroffen werden.²⁵⁸ Hinsichtlich der zeitlichen Begrenzung der Bearbeitungszeit ist es zudem vorteilhaft, dass die Objektträger in großer Anzahl und identischen Formaten günstig zu beschaffen sind.

Herstellung der Überzug-Additiv-Kombinationen

In den Versuchen werden die auf Schellack, Regalrez® 1126 beziehungsweise auf den Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“ basierenden Überzugssysteme mit den Zusätzen des HALS UV-Stabilisator 292 (2 %-ig), des UV-Absorbers Tinuvin® 900 (3 %-ig) und eine Kombination beider versetzt.²⁵⁹ Zudem werden Vergleichsproben ohne stabilisierende Zusätze benötigt, sodass sich pro Überzugssystem jeweils vier unterschiedliche Überzug-Additiv-Kombinationen ergeben (siehe Abb. 6).

Zusatz/ Überzug	Schellack	Regalrez® 1126	Nitrocelluloselack
Ohne/ Referenzprobe	SL-O	RR-O	CN-O
UV Stabilisator 292	SL-292	RR-292	CN-292
Tinuvin® 900	SL-900	RR-900	CN-900
Kombination: UV Stabilisator 292 & Tinuvin® 900	SL-KB	RR-KB	CN-KB

Abbildung 6 Übersicht der erprobten Überzugs-Additivkombinationen

Der flüssige UV-Stabilisator 292 ist mit den Lösemitteln bzw. -gemischen der zu erprobenden Überzugssysteme mischbar.²⁶⁰ Hingegen ist das pulverförmige Tinuvin® 900 schlecht in Ethanol und Siedegrenzbenzin löslich. Jedoch besteht eine ausreichend gute Löslichkeit in Xylol,²⁶¹ welches wiederum mit Ethanol und Siedegrenzbenzin mischbar ist.²⁶² In dem Lösemittelgemisch des Nitrocelluloselack ist bereits ein Anteil Xylol enthalten, weshalb ebenfalls eine Mischbarkeit

²⁵⁵ Vgl. SCHAEFFER/LANGFELD 2014.

²⁵⁶ Vgl. MATTERN 2004.

²⁵⁷ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

²⁵⁸ Vgl. ebd., S. 76.

²⁵⁹ Die Konzentrationen beziehen sich auf den Feststoffgehalt in der Lösung.

²⁶⁰ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: UV-Stabilisator 292 HALS

²⁶¹ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Tinuvin® 900

²⁶² Vgl. PIETSCH 2005, S. 99.

angenommen werden kann.²⁶³ Durch ein Auflösen des Tinuvin® 900 in Xylol kann deshalb ein Einbringen des Additivs in die Überzüge erzielt werden. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der einzelnen Probefilme wird allen Probenvarianten, unabhängig davon ob Tinuvin® 900 enthalten ist, dieselbe Menge an Xylol beigelegt.

Die als Feststoffe bezogenen Ausgangsmaterialien für die auf Schellack und Regalrez® 1126 basierenden Überzugssysteme werden zunächst mit geeigneten organischen Lösemitteln in Lösung gebracht.²⁶⁴ In Vorversuchen zu dem Auftrag der Lacke auf die Glasobjektträger zeigte bei dem Schellack und dem Regalrez® 1126 eine 30 %-ige Konzentration die beste Verarbeitbarkeit mit den gleichmäßigsten Ergebnissen.²⁶⁵ Da, wie zuvor erläutert, der Zusatz von einer geringen Menge an Xylol notwendig ist, werden zunächst Stammlösungen des Schellacks und des Regalrez® 1126 mit erhöhter Konzentration (40 %-ig) angesetzt. In einem zweiten Schritt werden diese auf die Zielkonzentration von 30 % Feststoffgehalt durch Hinzufügen der gleichen Mengen an Xylol verdünnt.

In den Vorversuchen ließ sich der Nitrocelluloselack in der bereits vordefinierten Konzentration von 22 %²⁶⁶ adäquat aufbringen. Als Großteil des Lösemittelgemisch enthält der Lack n-Butylacetat, in welchem das Tinuvin® 900 als nur schlecht löslich beschrieben wird.²⁶⁷ Zwar werden bereits geringe Mengen an Xylol als Inhaltsstoff des flüssigen Überzugs beschrieben,²⁶⁸ jedoch wird das Tinuvin® 900 gleich wie bei den anderen Überzugsvarianten zunächst in reinem Xylol aufgelöst. Dadurch soll das adäquate Auflösen des Additivs gewährleistet werden. Auch hier wird allen Probenvarianten dieselbe Menge an Xylol beigelegt.²⁶⁹

Auftragen der Filme

Die Vorgehensweise zum Auftragen der Filme auf die Objektträger wird in Vorversuchen erarbeitet. Dabei werden die Aufbringung der drei Überzugssysteme mit verschiedenen Filmziehrakeln und variierenden Filmdicken erprobt und bewertet. Es werden geeignete Konzentrationen, Auftragsmengen und die Handhabung des Rakels etabliert, mit welchen den Anforderungen an die Probekörper entsprechende Überzugsfilme hergestellt werden können.²⁷⁰ Hinsichtlich der Handhabung und der Reproduzierbarkeit wird das Auftragen der Überzugsfilme auf die

²⁶³ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

²⁶⁴ Siehe 8 Anhang: 8.1.2 Herstellung der Überzug-Additiv-Kombinationen

²⁶⁵ Siehe 8 Anhang: 8.1.1 Vorversuche zur Herstellung der Probekörper

²⁶⁶ Siehe 8 Anhang: 8.1.1 Vorversuche zur Herstellung der Probekörper

²⁶⁷ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Tinuvin® 900, Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

²⁶⁸ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Tinuvin® 900

²⁶⁹ Siehe 8 Anhang: 8.1.2 Herstellung der Überzug-Additiv-Kombinationen

²⁷⁰ Siehe 8 Anhang: 8.1.1 Vorversuche zur Herstellung der Probekörper

Objektträger mit einer Schichtdicke von 200 μm mittels eines Knochenrakel (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) als geeignetste Variante bewertet. Hierfür wird zudem eine Vorrichtung entwickelt, welche als Anschlag fungieren und die jeweiligen Objektträger während des Auftragsprozess fixiert und das ebenmäßige Aufsetzen und Ziehen des Rakels ermöglicht (siehe Abb. 7).

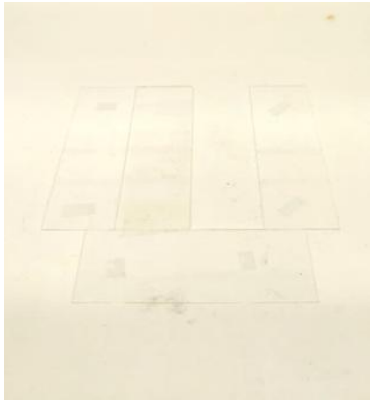


Abbildung 7 ein Objektträger in der Vorrichtung zum Auftragen der Überzugsfilme, VIS

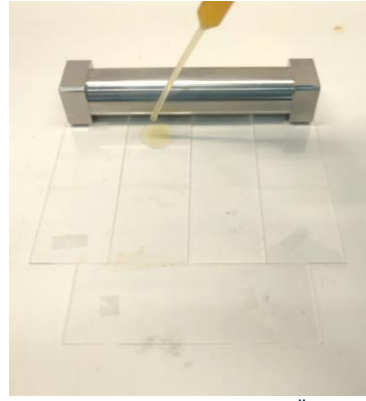


Abbildung 8 Auftropfen des Überzuges auf den Objektträger vor den Rakel, VIS



Abbildung 9 Probekörper: Überzugsfilm auf Glasobjektträger, VIS

Vor dem Aufbringen der Überzugfilme auf die Glasobjektträger werden diese mit Aceton von anhaftendem Schmutz gereinigt. Die gereinigten Objektträger werden während des anschließenden Auftragsprozesses ausschließlich mit Handschuhen gehandhabt. Da Staubpartikel und Fasern leicht anhaften können, werden die Trägeroberflächen zudem unmittelbar vor dem Filmauftrag trocken mit einem Tuch abgewischt, um Verunreinigungen der Probefilme zu minimieren. Für die Herstellung der Probekörper werden jeweils drei Tropfen der entsprechenden Überzugsvariante vor den Rakel auf den Objektträger aufgebracht (siehe Abb. 8, 9) und das Material zügig in einer gleichmäßigen Bewegung verteilt.²⁷¹ Diese Bewegung wird über das Ende des Objektträgers hinausgeführt, um überschüssiges Material abzunehmen. Nach jedem Filmauftrag werden Rakel und Vorrichtung mit einem geeigneten Lösemittel gründlich von Überzugsresten gereinigt, um Rückstände als Ursache für inhomogene Schichtdicken oder Unregelmäßigkeiten in der Filmoberfläche zu vermeiden. Die Proben werden anschließend bei kontrollierten klimatischen Bedingungen getrocknet. Bei vergleichbaren in der Literatur beschriebenen Versuchen^{272 273} werden zum Teil Trocknungszeiten von bis zu zwei Wochen angegeben. Aufgrund des begrenzten zeitlichen Rahmens wird bei dieser Arbeit eine ausreichende Trocknungszeit über das Erreichen einer Oberflächenhärte definiert: nach einer

²⁷¹ Siehe 8 Anhang: 8.1 Protokolle zur Herstellung der Probekörper

²⁷² Vgl. DE LA RIE 1993, S. 567.

²⁷³ Vgl. DE LA RIE 1988a, S. 70.

Trocknungszeit von 84 h lassen sich die Filme nicht mehr mit dem Fingernagel eindrücken. Zusätzlich wird zur Absicherung eine weitere Trocknungszeit von 24 h abgewartet.

Anzumerken ist, dass die Überzüge zwar mit einer nassen Auftragsdicke von 200 µm appliziert werden, sich die Schichtdicke jedoch durch das Verdunsten des Lösungsmittels bei der Trocknung reduziert hat. Da alle Proben mit identischen Konzentrationen und mit dem gleichen Vorgehen bei der Herstellung gefertigt werden, ist die resultierende trockene Schichtdicke zwischen den Vergleichsgruppen dennoch als weitgehend vergleichbar anzunehmen.

4.3 Künstliche Alterung der Probekörper

Die der Arbeit zugrunde liegende Fragestellung bezieht sich auf Degradationsprozesse transparenter Überzugsmaterialien, welche durch Bestrahlung mit UV-Strahlung initiiert werden. Aufgrund dessen werden Probekörper einer künstlichen photochemischen Alterung mittels UV-Strahlung ausgesetzt. Unter UV-Strahlung wird elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Spektrums im Wellenlängenbereich von ca. 380 bis 100 nm verstanden.²⁷⁴ Mit abnehmender Wellenlänge steigt die Energie, während die Eindringtiefe in Materialien abnimmt.²⁷⁵ Üblicherweise wird das UV-Spektrum in Teilbereich, der UVA (315-380 nm), UVB (280-315 nm) und UVC (100-280 nm), unterteilt.²⁷⁶ Der dem UVC-Bereich zuzuordnende Teil der Sonnenstrahlung wird durch die Atmosphäre absorbiert und erreicht die Erdoberfläche nicht.²⁷⁸ UVB-Strahlung tritt an der Erdoberfläche auf, wird in Innenräumen jedoch häufig durch Fensterglas deutlich reduziert. In nicht speziell UV-geschützten Innenräumen trifft daher vor allem der UVA-Anteil auf Objektoberflächen und kann dort photochemische Alterungsprozesse in den Materialien initiieren.²⁷⁹ Aufgrund des begrenzten Zeitrahmens der Arbeit und der verfügbaren Gerätetechnik wird die Alterung der Probekörper jedoch nicht mit UVA, sondern mittels UVC-Bestrahlung durchgeführt. Die Wahl von UVC beruht darauf, dass diese Strahlung eine deutlich höhere Energie aufweist.²⁸⁰ In kurzer Bestrahlungszeit werden davon mess- und beobachtbare Veränderungen der Materialeigenschaften erhofft. Dadurch soll es möglich sein, innerhalb des vorgesehenen Untersuchungszeitraums aussagekräftige Alterungserscheinungen zu erzeugen

²⁷⁴ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 13f.

²⁷⁵ Vgl. HORIE 2010, S. 39.

²⁷⁶ Vgl. FELLER 1994, S. 47.

²⁷⁷ In der Physik existieren neben der Einteilung in UV-A, UV-B und UV-C weitere Klassifikationen des UV-Spektrums, beispielsweise die Unterteilung in nahe UV-Strahlung (300–400 nm), mittlere UV-Strahlung (200–300 nm) und ferne UV-Strahlung (100–200 nm). (Vgl. KIEFER 1977, S. 2) In der vorliegenden Arbeit wird jedoch die Einteilung in UV-A/UV-B/UV-C verwendet, da diese in der konsultierten Literatur überwiegend Verwendung findet.

²⁷⁸ Vgl. VALET/BRAIG 2017, S. 14.

²⁷⁹ Vgl. FELLER 1994, S. 87, 91.

²⁸⁰ Vgl. KIEFER 1977, S. 3.

und diese mit den eingesetzten Evaluationsmethoden zu erfassen und zu vergleichen. Bei der Bewertung und Interpretation der Versuchsergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Art der photochemisch induzierten Reaktionen vom Wellenlängenbereich der absorbierten Strahlung abhängen (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse) und die durchgeführte Alterung nicht ohne weiteres auf natürlich ablaufende Alterungsprozesse zu übertragen ist.

Aufgrund der Komplexität und dem Zusammenspiel mehrerer zum Teil parallel ablaufender Reaktionsprozesse bei der Degradation organischer Materialien (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse) ist die eindeutige Zuordnung beobachteter Alterungserscheinungen zu einzelnen Ursachen schwierig. Um den Einfluss nicht untersuchter Faktoren möglichst zu minimieren beziehungsweise bei der Auswertung berücksichtigen zu können, werden Begleitparameter soweit möglich kontrolliert oder dokumentiert. Temperaturerhöhungen, beispielsweise durch die eingesetzten Strahlungsquellen, können zu Prozessen der thermischen Alterung und zudem zu Veränderungen der relativen Luftfeuchte führen.²⁸¹ Dies könnte die durch photochemische Degradation erwirkten Eigenschaftsveränderungen der Materialien verändern. Etwaige während der Alterung auftretende Schwankungen der Umgebungsbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte) werden deshalb mittels eines Datenloggers protokolliert.²⁸²

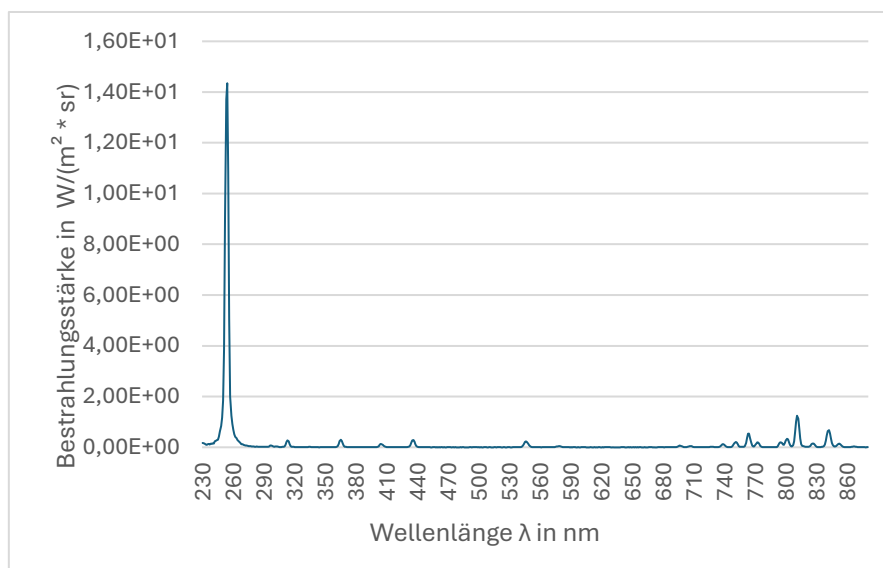


Abbildung 10 Spektrum der emittierten Strahlung der UVC-Quelle „UV STICK E40 H-NX“

Für die in dieser Arbeit untersuchte Anwendung liegt keine Literatur zur künstlichen Alterung mittels UVC-Strahlung vor. Dies ist auch damit zu begründen, dass die künstliche Alterung mittels UVC-Strahlung kein gängiges Vorgehen ist und hinsichtlich realer Expositionsbedingungen keine direkte Relevanz besitzt. Entsprechend fehlen Richtwerte für die Versuchsparemeter. Da nur eine

²⁸¹ Vgl. FELLER 1994, S. 54f, 143.

²⁸² Siehe 8 Anhang: 8.3 Umgebungsbedingungen während der UVC-Alterung

einzigste UVC-Quelle für die Verwendung zu Verfügung steht, ergeben sich daraus das Strahlungsspektrum und die Strahlungsleistung. Die Probekörper werden durch die Bestrahlung mit der UVC-Quelle „UV STICK E40 H-NX“ der Firma uv-technik Meyer GmbH (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) der künstlichen Alterung unterzogen. Der Abstand von Strahlungsquelle zu den Proben beträgt hierbei 25 cm. Die Strahlung wird mit einer Strahlungsleistung von ca. 2350 mW emittiert und umfasst vor allem Wellenlängen zwischen 250-257 nm (siehe Abb. 10), jedoch auch einen geringen Umfang Strahlung im nahen Infrarot-Bereich. Da aufgrund des zeitlichen Rahmens der Arbeit keine Vorversuche zur Kalibrierung einer geeigneten Expositionszeit durchgeführt werden können, wird zunächst ein definierter Alterungszyklus von 120 h festgelegt. Anschließend wird mit den vorgesehenen Evaluationsmethoden geprüft, ob messbare Veränderungen vorliegen. Falls dies nicht der Fall ist, wird die Bestrahlung in einem weiteren Intervall fortgeführt und erneut bewertet.

4.4 Evaluationsmethoden

Zur Evaluierung der Versuchsergebnisse werden verschiedene durch Alterungsprozesse veränderte Eigenschaften betrachtet, wie das optische Erscheinungsbild und das Löslichkeitsverhalten.²⁸³ Zum einen werden die Probekörper subjektiv makroskopisch und mikroskopisch bewertet. Um die optisch wahrnehmbaren Eigenschaftsveränderungen möglichst genau darzustellen, werden zudem Messmethoden eingesetzt, welche objektiv ermittelte, möglichst durch quantitative Zahlenwerte beschriebene Daten liefern. Außerdem erfolgen Versuche um mittels ATR-FTIR-Spektroskopie Aussagen zum Löslichkeitsverhalten der Probefilme zu erhalten. Im Folgenden wird die Auswahl der Untersuchungsmethoden erläutert und das jeweilige Vorgehen beschrieben.

4.4.1 Makroskopische und mikroskopische Bewertung

Die einfachste Methode, um Veränderungen von Materialien zu dokumentieren und zu bewerten, ist die optische Betrachtung. Zur Beurteilung von Veränderungen im Erscheinungsbild werden zunächst makroskopische Beobachtungen herangezogen, die sowohl bei normaler Beleuchtung (VIS) als auch unter UV-Strahlung erfolgen. Zudem ermöglichen Vergrößerungshilfen das Erkennen feinere Abweichungen und es können aus den Beobachtungen Rückschlüsse auf weitere Materialeigenschaften gezogen werden. So können beispielsweise bei der Durchlichtmikroskopie erkennbare Risse in den Filmen Hinweise auf die innere Struktur liefern und entsprechende Schlussfolgerungen ermöglichen.²⁸⁴

Die VIS-Betrachtung erfasst das im sichtbaren Spektralbereich wahrnehmbare Erscheinungsbild der Überzugmaterialien: die Eigenfarbe, Transparenzgrad und den Glanzgrad der Oberfläche. Ergänzend wird unter UV-Strahlung das Lumineszenzverhalten bewertet. Lumineszenz bezeichnet allgemein die Emission elektromagnetischer Strahlung nach vorheriger Anregung des Materials. Bei UV-induzierter Lumineszenz nimmt das Material bei der Bestrahlung mit UV-Strahlung Energie auf. Ein Teil dieser Energie wird in Wärme umgewandelt; ein Teil jedoch als langwelligere Strahlung zum Teil im sichtbaren Spektrum abgeführt.²⁸⁵ Farbe und Intensität der Emission können Hinweise auf die Materialzusammensetzung liefern und zur Unterscheidung von Materialien beitragen. Zugleich können Veränderungen des Lumineszenzverhaltens auf Zustands- bzw. Alterungsprozesse hinweisen, da sich diese in strukturellen Änderungen niederschlagen können.

²⁸³ Vgl. HORIE 2010, S. 37.

²⁸⁴ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 76ff.

²⁸⁵ Vgl. BACCI 2019, S. 29.

Bei diesen Methoden ist zu beachten, dass sie auf subjektiven Einschätzungen beruhen. Um die Variable der Subjektivität zu minimieren und aussagekräftige Befunde zu erhalten, werden als Bewertungsgrundlage Fotos unter standardisierten Rahmenbedingungen aufgenommen. Die Aufnahmen werden mit einer Kamera und Makroobjektiv (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) angefertigt. Alle Proben werden aus immer gleicher Position fotografiert mit gleichbleibenden Kameraeinstellungen (ISO, Belichtungszeit, Blende). Für Aufnahmen im sichtbaren Spektralbereich (VIS) erfolgt die Beleuchtung mit zwei Fotolampen einer Farbtemperatur von 5500 K (Tageslicht). Für UV-Aufnahmen werden zwei UV-Lampen verwendet, die Strahlung im Bereich von 360–370 nm mit einem Maximum bei 365 nm emittieren. An sämtlichen VIS-Fotos wird nachträglich ein Farbabgleich anhand eines Colorcheckers (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) durchgeführt. Bei den UV-Fotos erfolgte ein Weißabgleich mithilfe eines UV-Targets.

Die mikroskopische Betrachtung wird mit dem Axiolab A von Zeiss durchgeführt, wobei Fotos mittels Mikroskopkamera aufgenommen werden (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Die mikroskopische Untersuchung im Durchlicht wird eingesetzt, um die innere Struktur der Überzugfilme sowie mögliche Inhomogenitäten (z. B. Einschlüsse, Phasentrennungen oder Additivagglomerate) sichtbar zu machen und Hinweise auf alterungsbedingte Defekte (insbesondere Mikrorissbildung) zu erfassen.

4.4.2 Farbwertmessungen

Optisch wahrnehmbare, durch die künstliche Alterung induzierte Veränderungen der Probekörper können mit dieser Methode anhand objektiv bestimmter Zahlenwerte bewertet werden. Dadurch werden die zuvor bei der makroskopischen Betrachtung subjektiv gewonnenen Eindrücke quantifiziert und mit belastbaren Messwerten untermauert.

Die Farbwerte werden mittels dem Farbmessgerät „Spectro-guide sphere gloss“ der Firma BYK-Gardner (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis) ermittelt. Sie entsprechen dem geräteunabhängigen CIELAB-Farbraum. Dieser Farbraum ist durch die CIE standardisiert und ermöglicht wahrnehmungsgerechte Erfassung und Beschreibung von Farben und Farbunterschieden.²⁸⁶ Der Farbraum wird durch drei Achsen definiert (siehe Abb. 11). Die Helligkeit wird anhand der L*-Achse mit Werten zwischen 0 (schwarz) und 100 (weiß) beschrieben. Die a*-Achse stellt den Farbbereich von Grün bis Rot und die b*-Achse von Blau bis gelb dar.²⁸⁷ In einem kartesischen Koordinatensystem lässt sich anhand der L*-, a*- und b*-

²⁸⁶ Vgl. KIPPAN 2000, S. 1158.

²⁸⁷ Vgl. STROMER/SILVESTRINI/FISCHER 2005, S. 171f.

Koordinaten jeder Farbton verorten. Aufgrund der begrenzten menschlichen Farbwahrnehmung ist der tatsächlich darstellbare Farbraum unregelmäßig geformt.²⁸⁸

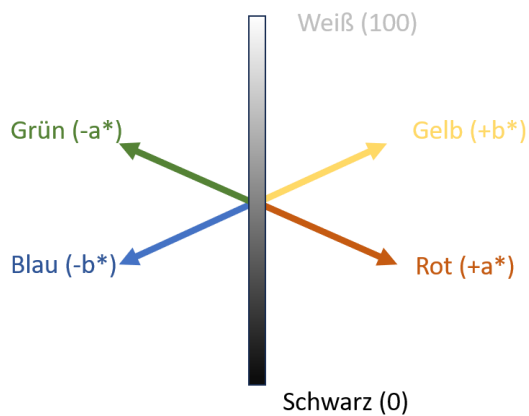


Abbildung 14 L^* , a^* und b^* -Werte im CIELAB-Farbraum



Abbildung 11 Schablone mit Führungshilfe des Farbmessgerätes, VIS

Der Unterschied zwischen zwei Farbtönen im CIELAB-Farbraum kann anhand der L^* -, a^* - und b^* -Werte mittels einer Berechnungsformel quantifiziert werden. Der sogenannte Delta-E-Wert (ΔE) entspricht dem Abstand zweier Farbtöne in dem dreidimensionalen Farbraum.²⁸⁹ Er kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

Allgemein gilt, je größer ΔE desto größer ist der Farbunterschied. Zur Einordnung der Farbabweichungen kann ein Bewertungsmaßstab nach DIN 53218 herangezogen werden:²⁹⁰

- $\Delta E = 0$ kein Farbunterschied
- $\Delta E = 1$ Spur eines Farbunterschieds
- $\Delta E = 2$ kleiner Farbunterschied
- $\Delta E = 3$ mittlerer Farbunterschied
- $\Delta E = 4$ großer Farbunterschied
- $\Delta E = 5$ sehr großer Farbunterschied

Die Messungen an den Probekörpern erfolgen mit der Einstellung D65/10° (Lichtart/ Beobachter). Vor den Messreihen wird das Messgerät mit beiliegenden Referenzen kalibriert. Pro Probenart (Überzug-Additiv-Kombination) werden drei Probekörper untersucht. Auf jedem Probekörper

²⁸⁸ Vgl. KIPPHAN 2000, S. 73f.

²⁸⁹ Vgl. LÜBBE 2013, S. 130f.

²⁹⁰ Vgl. ebd.

werden drei Messflächen erfasst, sodass sich neun Messwerte pro Probenart und Messzeitpunkt ergeben. Um Einflüsse durch Schichtdicken- und Auftragsschwankungen der gezogenen Filme zu minimieren, werden die Messpunkte in den gleichmäßigsten Bereichen der Beschichtungen gewählt. Die Messstellen sind deshalb mit Abstand zu den Kanten und zum Anfang und Ende des gezogenen Films, mittig auf den Probekörpern lokalisiert. Für die Durchführung der Farbwertmessungen wird eine Schablone angefertigt (siehe Abb. 12). Diese dient zum einen als plane Auflagefläche für das Messgerät und ermöglicht mittels Markierungen das exakte Positionieren des Messgerätes um die Messpunkte für Vor- und Nachzustandsmessungen zu reproduzieren. Zum anderen wird seitlich in die transluziden Glasobjektträger einfallendes Licht, welches die Messergebnisse beeinflussen kann, vermieden. Die Schablone wird aus einer dicken Pappe mit einer Aussparung in den Abmessungen der Probekörper gefertigt, sodass die Probekörper bündig eingesetzt werden können.

Da die Probekörper transparent sind, wird für alle Messungen ein einfarbiger weißer Untergrund verwendet. Dessen Farbe geht zwar in die Messung ein, stellt jedoch einen unveränderten und konstanten Faktor dar und erhält damit die Vergleichbarkeit der Messdaten zwischen den Messzeitpunkten.

4.4.3 Glanzwertmessungen

Neben der Eigenfarbe des Überzuges stellt auch der Glanzgrad des Films einen wesentlichen Parameter für die ästhetische Wirkung transparenter Überzugssysteme auf Holzoberflächen dar. Glanz beschreibt die Fähigkeit einer Oberfläche, einfallendes Licht ganz oder teilweise spiegelnd (gerichtet) zu reflektieren. Rauere, als matt wahrgenommene Oberflächen streuen das eingestrahlte Licht dagegen überwiegend diffus.²⁹¹ Glanzmessungen beruhen entsprechend auf dem unterschiedlichen Reflexions- und Streuverhalten von Oberflächen.²⁹²

Da der Glanzgrad und im vorliegenden Zusammenhang insbesondere dessen Veränderung visuell nur eingeschränkt zu beurteilen ist, wurden instrumentelle Messungen mit dem Glanzmessgerät Novo-Gloss Trio der Firma Rhopoint durchgeführt (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Das Gerät ermöglicht Messungen gemäß DIN EN ISO 2813, wobei die Probenoberfläche mit Licht unter drei definierten Messwinkeln (20°, 60° und 85°) bestrahlt wird. Die Intensität des spiegelnd reflektierten Lichtanteils wird erfasst und als Glanzeinheiten (Gloss Units, GU) ausgegeben. Höhere GU-Werte entsprechen einem höheren Glanzgrad der Oberfläche.²⁹³

²⁹¹ Vgl. ebd., S. 154.

²⁹² Vgl. KIPPHAN 2000, S. 114.

²⁹³ Vgl. RHOPPOINT INSTRUMENTS GMBH 2023.

Welcher Messwinkel verwendet werden muss, ist abhängig von der Höhe des Oberflächenglanzes.²⁹⁴ Der Messwinkel von 60° gilt als Standardwinkel und wird für Oberflächen mit mittlerem Glanz (10–70 GU) eingesetzt. Überschreitet der Messwert bei 60° den Wert von 70 GU wird die Oberfläche als hochglänzend eingeschätzt und die Verwendung des 20°-Winkels wird empfohlen. Dieser ermöglicht aufgrund einer höheren Empfindlichkeit in diesem Bereich eine bessere Differenzierung. Für matte Oberflächen kommt hingegen die Messeinstellung des 85°-Winkel zum Einsatz. Dies ist insbesondere der Fall, wenn der 60°-Glanzwert unter 10 GU liegt.²⁹⁵

Die Wahrnehmbarkeit von Glanzunterschieden ist vom Ausgangsglanzgrad der Oberfläche abhängig. Bei matten Oberflächen können bereits geringe Abweichungen (z. B. im Bereich von etwa 3 GU) unter Umständen noch visuell erkannt werden, während Unterschiede gleicher Größe bei höheren Glanzgraden nicht mehr wahrnehmbar sind. Allgemein wird angenommen, dass bei Verwendung der jeweils geeigneten Messgeometrie Glanzdifferenzen von etwa 5 GU gerade noch als wahrnehmbar gelten.²⁹⁶

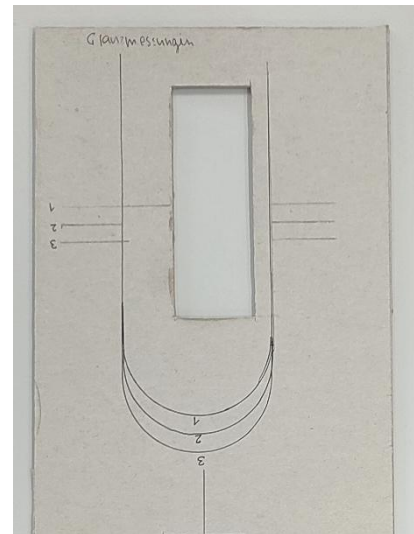


Abbildung 15 Schablone mit Markierungen für die Glanzwertmessungen, VIS

Hinsichtlich der Auswahl der Messflächen sowie des konkreten Vorgehens wird auf das Kapitel 4.4.2 Farbwertmessungen verwiesen. Anzahl und Lage der Messstellen sowie die Durchführung entsprechen dem Vorgehen bei den Farbwertmessungen (siehe Abb. 15). Vor den Messreihen wird das Messgerät mit der beiliegenden Referenz kalibriert.

4.4.4 Versuche zum Löslichkeitsverhalten

Ziel der Versuche ist es zu prüfen, ob sich das Löslichkeitsverhalten der Probefilme durch die künstliche Alterung verändert. Im Fokus steht dabei die Frage, ob gealterte Probenbestandteile im Vergleich zum Ausgangszustand schneller oder langsamer in Lösung gehen. Aus solchen Unterschieden lassen sich Hinweise auf mögliche Veränderungen der inneren Struktur ableiten, beispielsweise durch zusätzliche Verknüpfungen oder veränderte Zwischenmolekulare Wechselwirkungen infolge photochemischer Degradation (siehe 3.1 UV-induzierte

²⁹⁴ Vgl. LÜBBE 2013, S. 155.

²⁹⁵ Vgl. RHOPPOINT INSTRUMENTS GMBH 2026.

²⁹⁶ Vgl. ebd.

Degradationsprozesse). Zudem werden Aussagen ermöglicht, ob die Zusätze bereits im ungealterten Zustand Einfluss auf das Lösungsverhalten der Überzugssysteme hat.

In der Literatur mit vergleichbaren Versuchen werden Veränderungen über Verschiebungen von Löslichkeitsbereichen²⁹⁷ häufig über Reihen von Lösungsmitteln unterschiedlicher Polarität untersucht und anschließend anhand insbesondere visueller Kriterien bewertet.^{298 299} Diese Vorgehensweise weist jedoch einen ausgeprägten subjektiven Anteil auf, da die Beurteilung maßgeblich von der Wahrnehmung der durchführenden Person abhängt. Insbesondere bei nur geringen Veränderungen ist eine eindeutige und reproduzierbare Unterscheidung zwischen „leichter“ und „starker“ Löslichkeit häufig schwierig. Vor diesem Hintergrund wird eine alternative Methodik erprobt, die in dieser Form in der Literatur nicht beschrieben ist und eine instrumentell gestützte, besser vergleichbare Auswertung ermöglichen soll.

Zur Objektivierung der Löslichkeitsbeobachtung wird ein definierter Versuchsaufbau mit anschließender ATR-FTIR-Analyse angewandt. Bei der ATR-FTIR-Spektroskopie³⁰⁰ wird gemessen, welche Infrarot-Wellenlängen von einer Probe absorbiert werden. Dabei wird das IR-Licht in einem ATR-Kristall intern reflektiert und dringt nur wenige Mikrometer in die direkt anliegende Probe ein, sodass nur die oberflächennahe Schicht erfasst wird.³⁰¹ Das Verfahren funktioniert für Feststoffe und Flüssigkeiten unabhängig von der Probendicke und eignet sich daher gut für vergleichende Analysen. Über charakteristische Banden lassen sich funktionelle Gruppen identifizieren. Im Zuge der Auswertung können zudem vergleichende Aussagen zur relativen Stoffmenge beziehungsweise Konzentration gelöster Bestandteile getroffen werden.³⁰²

Die zentrale Idee des Versuches besteht darin, eine definierte Menge eines Lösungsmittels auf die Probefilmoberfläche aufzubringen und nach einer bestimmten Einwirkzeit den gelösten Anteil des Überzugmaterials als Probe für die ATR-FTIR-Messung zu verwenden. Über die Intensitäten charakteristischer IR-Absorptionsbanden wird anschließend die relative Menge des gelösten Feststoffanteils bestimmt. Durch den Vergleich dieser Messgrößen zwischen Vorzustand und gealtertem Zustand sollen quantitative beziehungsweise semi-quantitative Aussagen darüber ermöglicht werden, ob die Alterung zu einer Zunahme oder Abnahme der Löslichkeit (und damit indirekt zu strukturellen Veränderungen innerhalb des Überzugs) geführt hat.

²⁹⁷ Vgl. PIENA 2001.

²⁹⁸ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1990a.

²⁹⁹ Vgl. DE LA RIE/McGLINCHEY 1989.

³⁰⁰ ATR: attenuated total reflection; FTIR-Spektroskopie: Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer

³⁰¹ Vgl. LIU/KAZARIAN 2022, S. 1777ff.

³⁰² Vgl. ebd.

Es werden folgende organische Lösungsmittel verwendet: Ethanol (Schellack), Siedegrenzbenzin 100–140 °C (Regalrez® 1126) und Aceton (Nitrocelluloselack) (siehe 4.1 Auswahl der zu erprobenden Materialien). Mit einer Pipette werden drei Tropfen des jeweiligen Lösungsmittels auf die Probenoberfläche aufgebracht. Die Einwirkzeit wird in Abhängigkeit von der Flüchtigkeit des Lösungsmittels variiert. Eine geeignete Zeitspanne wird vorab erprobt und anschließend als definierter Parameter konstant gehalten. Maßgeblich ist dabei, dass einerseits ein Lösungsvorgang einsetzt, andererseits jedoch noch ausreichend flüssiges Lösungsmittel für die Probenahme mit der Pipette verfügbar bleibt. Nach Ablauf der Einwirkzeit wird die entstandene Lösung (gelöster Überzuganteil im Lösungsmittel) mit der Pipette aufgenommen und es werden zwei Tropfen auf die ATR-Messfläche aufgetragen. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels wird der verbliebene Feststofffilm mittels ATR-FTIR gemessen. Aufgrund der Menge an Messgruppen und des begrenzten zeitlichen Rahmens erfolgt pro Messgruppe jeweils nur eine Messung (n=1). Die Ergebnisse werden anschließend zwischen Vorzustand und gealtertem Zustand für jede Überzug-Additiv-Kombination vergleichend ausgewertet.

Diese Untersuchungsmethode ist destruktiv und führt zur Probenzerstörung. Aufgrund dessen ist diese im Versuchsablauf zeitlich an letzter Stelle zu verorten.

4.5 Allgemeiner Versuchsaufbau

Im Folgenden wird der Gesamtaufbau des Versuchs und die zeitliche Abfolge der Probenherstellung, der Messungen im Vor- und Nachzustand und der künstlichen Alterung beschrieben.

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Proben und Messbedingungen werden zunächst Vorversuche zur Probenherstellung durchgeführt (Auswahl/ Handhabung der Materialien und Applikationsmethoden). Anschließend erfolgt die Herstellung der Probekörper. Die definierte Trocknungszeit wird vor Beginn der Untersuchungen abgewartet. Der Vorzustand wird durch eine fotografische Dokumentation im sichtbaren Bereich (VIS) und unter UV-Anregung und durch mikroskopische Untersuchungen erfasst. Ergänzend werden die Farbmessungen und Glanzmessungen durchgeführt. Im nächsten Schritt werden die Proben einer künstlichen photochemischen Alterung über fünf Tage unter überwachten Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Temperatur und relative Luftfeuchte wurden während der Alterung kontinuierlich mittels Datenlogger dokumentiert. Nach Abschluss der Alterung erfolgt erneut eine fotografische Dokumentation (VIS/UV) und die mikroskopische Untersuchung. Zudem erfolgen Farb- und Glanzwertmessungen der gealterten Probekörper. Die Löslichkeitsversuche werden

abschließend durchgeführt, da sie zur Zerstörung der Proben führen. Für den Vergleich werden hierfür zusätzlich ungealterte Probekörper herangezogen.

Eine weitere Alterungsperiode wurde nicht durchgeführt, da bereits nach der ersten Alterungsphase aussagekräftige Datensätze vorliegen und eindeutige Veränderungen an den Proben festgestellt werden konnten (siehe 5 Ergebnisse und Diskussion). Abschließend werden sämtliche Ergebnisse zusammengeführt und ausgewertet.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit der UV-Stabilisatoren „UV-Stabilisator 292“, Tinuvin® 900 und deren Kombination zur Stabilisierung ausgewählter transparenter Überzugssysteme diskutiert. Im Rahmen einer Versuchsreihe an künstlich photochemisch gealterten Probekörpern werden Überzüge auf Basis von Schellack, Regalrez® 1126 und dem Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“³⁰³ betrachtet. Eigenschaftsveränderungen durch photochemische Degradationsprozesse der jeweiligen Überzugs-Additiv-Kombinationen werden im Folgenden durch Vergleichen der nicht gealterten (Vor-)Zustände und den gealterten (Nach-)Zuständen der Probekörper herausgearbeitet. Die Auswertung basiert auf makroskopischen Betrachtungen unter VIS- und UV-Licht, auf mikroskopischer Untersuchung im Durchlicht, sowie Farbwertmessungen und Glanzwertmessungen. Zudem werden Versuche zum Löslichkeitsverhalten der Überzüge zur Bewertung herangezogen. Dadurch können neben optisch wahrnehmbaren Veränderungen auch nicht visuell erkennbare materialinterne Veränderungen erfasst werden. Die Ergebnisse werden zunächst nach einzelnen Evaluationsparametern gegliedert dargestellt und ausgewertet. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Befunde über alle Parameter hinweg sowie eine Diskussion im Kontext des Stands der Forschung und der im theoretischen Teil beschriebenen photochemischen Degradationsmechanismen.

5.1 Makroskopische und mikroskopische Betrachtung

Im Folgenden werden Eigenschaftsveränderungen der Überzugfilme erfasst, die mit dem menschlichen Auge, gegebenenfalls unterstützt durch UV-Anregung oder Vergrößerung, wahrnehmbar sind. Die Betrachtung unter sichtbarem Licht (VIS) dient der Beurteilung des Erscheinungsbildes im relevanten Spektralbereich und umfasst insbesondere Eigenfarbe, Transparenzgrad und den wahrgenommenen Glanzgrad der Oberfläche. Ergänzend ermöglicht die Untersuchung unter UV-Strahlung Aussagen über das Lumineszenzverhalten der frischen und gealterten Materialien.³⁰⁴ Zur detaillierteren Beurteilung erlaubt eine mikroskopische Untersuchung im Durchlicht,³⁰⁵ Aussagen zur inneren Struktur der Filme. Insgesamt liefern die VIS-, UV- und mikroskopischen Befunde eine qualitative bis semiquantitative Grundlage, um das Alterungsverhalten der unterschiedlichen Überzug-Additiv-Kombinationen vergleichend zu bewerten.

³⁰³ Siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

³⁰⁴ siehe 8 Anhang: 8.2 Fotodokumentation zu den optischen Betrachtungen

³⁰⁵ siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

5.1.1 Betrachtung unter visueller Strahlung

Im getrockneten nicht gealterten Zustand zeigen die Probekörper aller drei untersuchten Überzugssysteme (Schellack, Regalrez® 1126, Nitrocellulose-Lack) keine mit dem bloßen Auge erkennbaren Unterschiede in Abhängigkeit von den zugesetzten UV-Stabilisatoren. Farbeindruck, Oberflächenhomogenität und der jeweilige Glanzeindruck der Probekörper erscheinen innerhalb der Überzugsgruppen vergleichbar. Daraus lässt sich ableiten, dass die Additive im Ausgangszustand keine wahrnehmbare Eigenfarbe in die Überzugssysteme einbringen und dass makroskopisch keine Hinweise auf Inkompatibilitäten oder optisch relevante Wechselwirkungen (z. B. Trübungen oder Inhomogenitäten) beobachtet werden können.

Für Schellack zeigen alle Proben im Vorzustand die typisch gelblich-orange Eigenfärbung bei vergleichbarer mittelmäßiger Transparenz und ähnlichem Glanzgrad. Nach der künstlichen photochemischen Alterung ist bei sämtlichen Schellackproben eine Farbveränderung im Vergleich zum Vorzustand erkennbar (siehe Abb. 16). Die Farbigkeit der Proben ist als heller und weniger intensiv im Vergleich zum ungealterten Zustand zu beschreiben. Jedoch ist eine Tendenz zu erkennen, dass die Proben mit dem Zusatz von Tinuvin® 900 und der Kombination beider Zusätze eine geringere Veränderung der Farbigkeit im gealterten Zustand als die Referenzproben ohne Zusatz und die Proben mit dem UV-Stabilisator 292 zeigen. Die Unterschiede zwischen den Überzug-Additive-Kombinationen sind jedoch insgesamt nicht deutlich genug, um makroskopisch eine belastbare Abstufung in Abhängigkeit der Zusätze vorzunehmen.



Abbildung 16 Schellack-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV-Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292) jeweils im Vorzustand (links) und nach der künstlichen Alterung (rechts), VIS

Die Regalrez®-1126-Filme sind im Vorzustand farblos, vollständig transparent und weisen einen hohen, visuell wahrnehmbaren Glanz auf. Nach der Alterung tritt bei allen Proben eine sehr geringe Vergilbung bei weiterhin hoher Transparenz auf. Subjektiv betrachtet treten die Vergilbung bei Proben mit Tinuvin® 900 und der Kombination aus Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292 etwas stärker als bei der Vergleichsprobe ohne Zusatz auf. Diese Unterschiede sind jedoch nur nuancenhaft und können beobachterabhängig sein. Zudem sind sie aufgrund des starken

Oberflächenglanzes fotografisch nur eingeschränkt zu dokumentieren (siehe Abb. 17). Proben mit UV-Stabilisator 292 zeigen keine stärkere Verfärbung als die Vergleichsproben. Ob dabei insgesamt eine geringere Vergilbung vorliegt, lässt sich makroskopisch aufgrund der insgesamt geringen Veränderungen nicht sicher beurteilen.



Abbildung 17 Regalrez® 1126-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin®900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.:1. - Vorzustand 2.-5.-nach der künstlichen Alterung, VIS

Der NC-Lack trocknet im Vorzustand wie produktbeschrieben matt auf und zeigt eine nahezu farblose bis leicht gelblich-bräunliche Tönung. Nach der künstlichen Alterung weisen alle Proben eine deutliche Verschiebung zu einer gelb/orangenen Farbigkeit auf, wobei zum Teil Abstufungen in Abhängigkeit des Zusatzes in der Intensität erkennbar sind (siehe Abb. 18). Proben mit dem HALS-Zusatz UV-Stabilisator 292 erscheinen weniger stark verfärbt als die Vergleichsproben ohne Additive, während Proben mit Tinuvin® 900 und mit der Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292 eine tendenziell stärkere Farbveränderung zeigten als die Proben ohne Zusatz.



Abbildung 18 Nitrocelluloselack-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV-Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292) jeweils im Vorzustand (links) und nach der künstlichen Alterung (rechts), VIS

5.1.2 Betrachtung unter ultravioletter Strahlung

Nach der künstlichen Alterung zeigen alle drei Überzugssysteme Änderungen im Lumineszenzverhalten, deren Ausprägung in Abhängigkeit von den zugesetzten UV-Stabilisatoren variiert. Diese Unterschiede können als visuelle Indikatoren für unterschiedlich stark ablaufende Alterungsprozesse interpretiert werden. Eine geringere Veränderung der Lumineszenz im Vergleich zum nicht gealterten Verhalten kann darauf hindeuten, dass die Bildung UV-aktiver Alterungsprodukte (und damit bestimmte photochemische Reaktionswege) durch die Additive abgeschwächt wird. Umgekehrt kann eine stärkere Lumineszenzänderung auf eine ausgeprägtere Bildung solcher Produkte hinweisen. Entsprechend lassen sich aus dem relativen Ausmaß der Lumineszenzveränderungen vorsichtige, vergleichende Aussagen zur Alterungsintensität und davon abgeleitet zur potenziellen Wirksamkeit der UV-stabilisierenden Zusätze treffen.

Im getrockneten, nicht gealterten Zustand zeigen die Probekörper aller drei untersuchten Überzugssysteme (Schellack, Regalrez® 1126, Nitrocellulose-Lack) keine erkennbaren Unterschiede im Verhalten bei Bestrahlung mit UV-Strahlung. Daraus ist abzuleiten, dass die Additive im Ausgangszustand keine eigenständige, makroskopisch wahrnehmbare Lumineszenz aufweisen und das Lumineszenzverhalten der jeweiligen Überzugssystem zunächst nicht sichtbar verändern.

Bei den ungealterten Schellackfilmen ist bei der Betrachtung unter UV-Strahlung eine sehr schwache, dunkelorange Lumineszenz zu erkennen (siehe Abb. 19). Nach der künstlichen photochemischen Alterung zeigt sich bei allen Schellackproben eine deutliche Veränderung des Lumineszenzverhaltens. Insgesamt verschiebt sich die Erscheinung zu einer helleren, orangefarbenen Lumineszenz mit erhöhter Intensität. Gleichzeitig sind jedoch Unterschiede

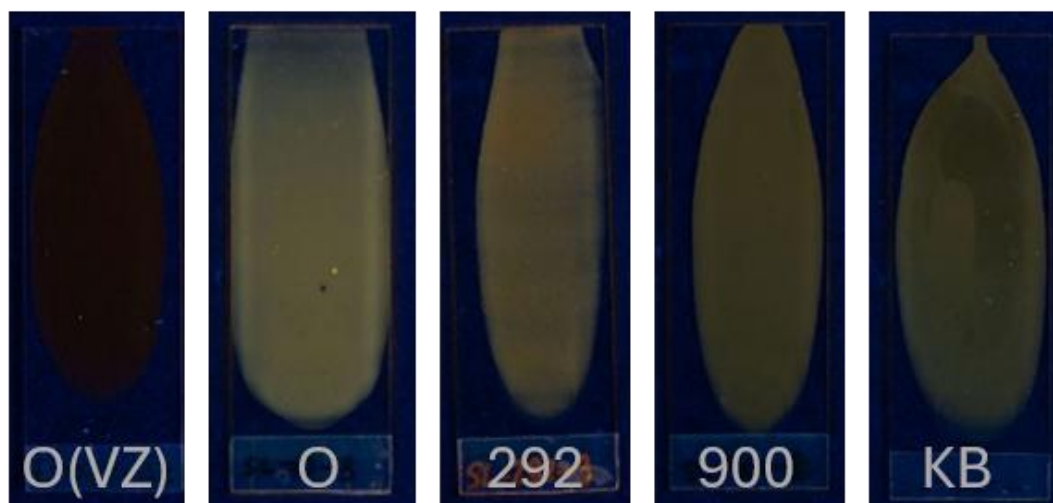


Abbildung 19 UV-Lumineszenzfarben von Schellack-Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O- ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV

zwischen den Zusatzvarianten erkennbar. Die größte Veränderung der Lumineszenz im Vergleich zum nicht gealterten Zustand tritt bei den Proben ohne Zusatz auf. Sie wirken im gealterten Zustand im Gesamtvergleich aller Schellackproben am hellsten und zeigten die intensivste orange Lumineszenz. Proben mit UV-Stabilisator 292 weisen ebenfalls eine Aufhellung/ Intensivierung auf, jedoch ist diese geringer ausgeprägt als bei der Referenz ohne Zusatz. Die geringste Veränderung zeigen Proben mit Tinuvin® 900 und mit der Kombination Tinuvin® 900/ „UV-Stabilisator 292“. Diese Probekörper zeigen im gealterten Zustand im Vergleich die geringste Lumineszenzintensität. Im Rahmen der UV-Betrachtung lässt sich dies als Hinweis auf eine im Vergleich geringere Ausbildung beziehungsweise Sichtbarkeit UV-aktiver Alterungsprodukte interpretieren.

Die ungealterten Probefilme auf Basis von Regalrez® 1126 zeigen unter UV-Anregung keine sichtbare Lumineszenz (siehe Abb. 20). Nach der Alterung lumineszieren hingegen alle Proben leicht in einer gelben Farbe, was auf eine durch die Alterung entstandene Änderung des optischen Verhaltens hinweist. Auch hier sind Intensitätsunterschiede zwischen den Varianten zu beobachten: Die Proben ohne Zusatz zeigen die stärkste Lumineszenz. Proben mit Tinuvin® 900 weisen eine geringere Intensität auf, diese ist jedoch weiterhin klar erkennbar. Die Proben mit dem „UV- Stabilisator 292“ und die Proben mit der Kombination der Zusätze zeigen ähnlich ausgeprägte, im Gesamtvergleich aber die schwächste wahrnehmbare Lumineszenz. Dies könnte auf das Vorhandensein geringerer Mengen UV-lumineszenzaktiver Alterungsprodukte im Probefilm sprechen. Insgesamt liegen die Unterschiede bei den Regalrez®-1126 Probekörpern auf einem niedrigen Intensitätsniveau, sind jedoch im direkten Vergleich der Probenreihen nachvollziehbar.

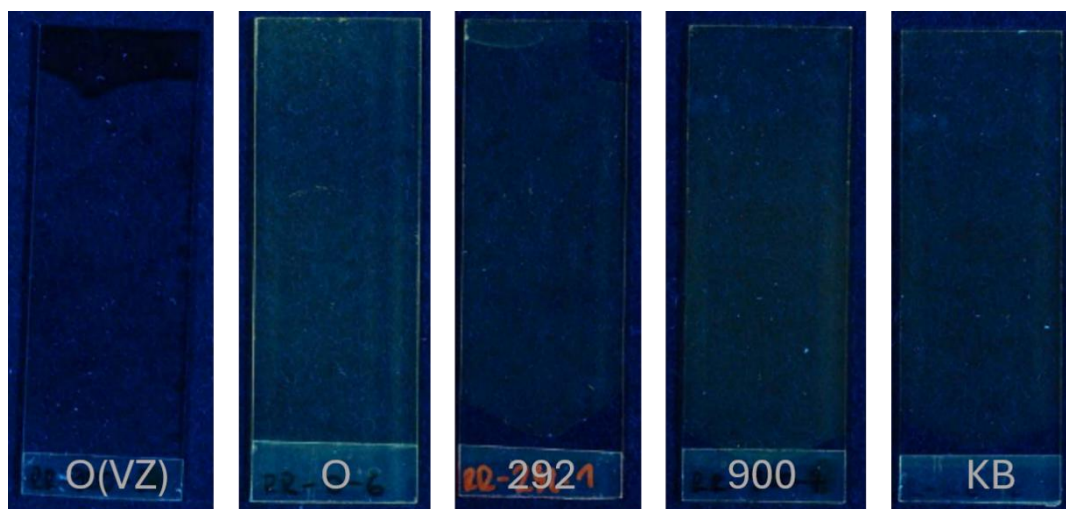


Abbildung 20 UV-Lumineszenz von Regalrez®1126 Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV

Beim Nitrocelluloselack kann im ungealterten Zustand kein Lumineszenzverhalten unter UV-Bestrahlung festgestellt werden (siehe Abb. 21). Nach der künstlichen Alterung zeigen dagegen alle Proben eine orangefarbene Lumineszenz, was auf eine deutliche Veränderung der Filmbestandteile schließen lässt.³⁰⁶ Die Intensität der Lumineszenz unterscheidet sich bei den Zusatzvarianten. Am stärksten lumineszieren die Proben mit Tinuvin® 900. Die Proben mit der Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292 zeigen eine sehr ähnliche, leicht geringere Ausprägung. Darauf folgen die Proben ohne Zusatz. Die geringste Lumineszenzintensität weisen die Proben mit UV-Stabilisator 292 auf. Die im Vergleich mit den gealterten Proben ohne Zusatz geringere Veränderung des Lumineszenzverhaltens bei Proben mit dem UV-Stabilisator 292 kann darauf hindeuten, dass alterungsbedingte Prozesse, die zur Bildung UV-aktiver (lumineszierender) Abbauprodukten führen, abgeschwächt werden.

Die als „stärker“ wahrgenommene Lumineszenz bei Proben mit Tinuvin® 900 ist gegebenenfalls nicht auf eine tatsächlich höhere Intensität zurückzuführen, sondern könnte auch auf eine andere Lumineszenzfarbe hindeuten. Als mögliche Ursachen kommen eine Eigenlumineszenz von Abbauprodukten des Tinuvin®-900 im Zuge der UV-Belastung oder Wechselwirkungen mit Bestandteilen des jeweiligen Überzugssystems Betracht. Insbesondere beim Nitrocelluloselack mit seiner komplexen Zusammensetzung (z. B. Kunstharze, Weichmacher)³⁰⁷ sind solche Effekte denkbar. Gleichzeitig ist anzumerken, dass sich im Vergleich der verschiedenen Überzugssysteme keine eindeutig, systematisch abweichende Lumineszenzfarbe ausschließlich in Anwesenheit von Tinuvin® 900 zeigte. Insgesamt ist die Lumineszenzbeobachtung daher vorsichtig zu interpretieren.

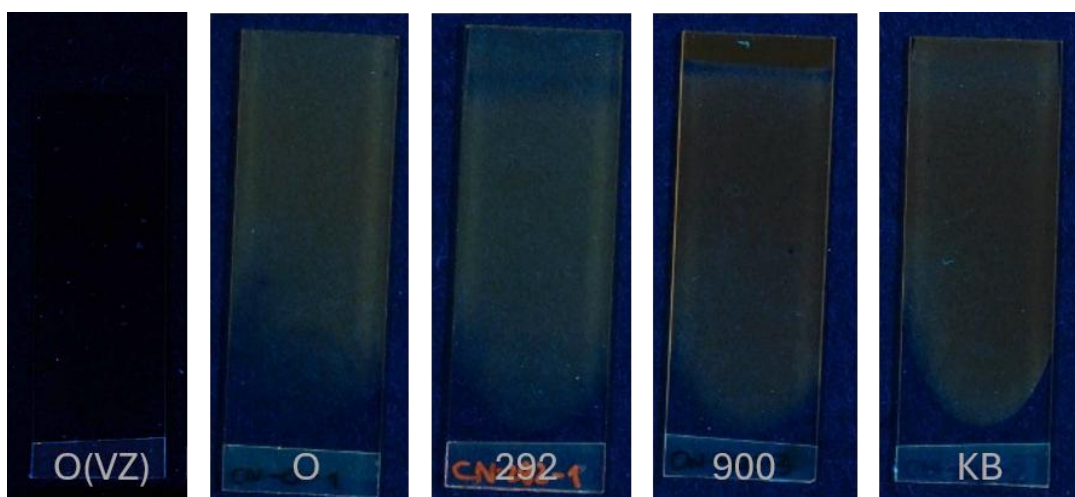


Abbildung 21 UV-Lumineszenz von Nitrocellulose- Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV

³⁰⁶ Vgl. BACCI 2019, S. 29.

³⁰⁷ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

5.1. 3 Mikroskopische Betrachtung im Durchlicht

Im Zustand vor der Alterung zeigen sich innerhalb der jeweiligen Überzugsgruppen keine erkennbaren strukturellen Unterschiede in Abhängigkeit von den zugesetzten UV-Stabilisatoren. Dies spricht dafür, dass die Zusätze unter den gewählten Herstellungsbedingungen adäquat gelöst beziehungsweise zumindest homogen verteilt vorliegen und keine mit der verwendeten Methode erkennbaren Agglomerate ausbilden.

Der Vergleich der ungealterten und künstlich photochemisch gealterten Zustände der Probekörper ergibt bei der eingesetzten Vergrößerung keine eindeutig erkennbaren Veränderungen der inneren Filmstruktur. Insbesondere konnten keine Risse oder vergleichbare Mikrodefekte festgestellt werden. Damit deutet die Durchlichtmikroskopie unter den vorliegenden Untersuchungsbedingungen darauf hin, dass die Alterung keine strukturellen Schädigungen hervorruft, die sich als Rissbildung oder deutliche Inhomogenitäten im Filminnen manifestieren.

Im Folgenden werden die mikroskopischen Befunde der einzelnen Überzugssysteme kurz beschrieben. Diese Beobachtungen gelten dabei jeweils unabhängig von den jeweiligen Zusätzen und Alterungszustand.

Bei der Durchlichtmikroskopie zeigen die Schellackfilme eine insgesamt inhomogene, wolkige Matrix (siehe Abb. 22). Innerhalb dieser Matrix sind zudem Partikel unterschiedlicher Größe erkennbar, die gleichmäßig verteilt und in verschiedenen Tiefenebenen der Überzugsschicht sichtbar sind. Da diese Partikel unabhängig von den Zusätzen auftreten, ist davon auszugehen, dass es sich überwiegend um unlösliche, beziehungsweise nicht vollständig gelöste Bestandteile des Schellacks handelt oder um Verunreinigungen als Teil des Ausgangsmaterials.³⁰⁸ Auch bei der Aufbereitung im Zuge des Versuches können Verunreinigungen eingebracht worden sein. Die Befunde stützen damit die makroskopische Wahrnehmung der nur begrenzt transparenten Schellackschichten (siehe 5.1.1 Betrachtung unter visueller Strahlung).

Die Filme auf Basis von Regalrez® 1126 erscheinen im Durchlicht vollständig transparent und zeigen keine erkennbare innere Struktur (keine Partikel, Trübungen oder Phasentrennungen) im Rahmen der verwendeten Vergrößerung. Vereinzelt sichtbare Schmutzpartikel bzw. Fasern liegen oberflächlich auf und sind nicht als Bestandteil des Überzugsfilms zu interpretieren. Dieser Befund entspricht der makroskopischen Beobachtung, dass die Regalrez® 1126-Probefilme optisch vollständig transparent erscheinen (siehe 5.1.1 Betrachtung unter visueller Strahlung).

³⁰⁸ Vgl. MILLS/WHITE 1987, S. 101.

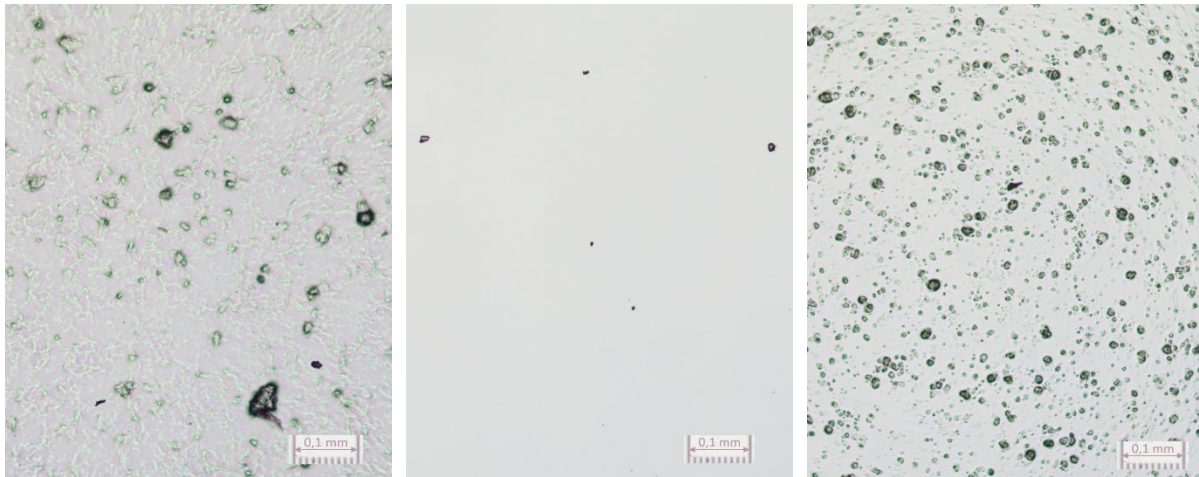


Abbildung 22 Mikroskopaufnahmen der Struktur der Probefilme, v.l.n.r. Schellack, Regalrez® 1126, Nitrocellulose; Durchlicht, VIS

Der Nitrocelluloselack zeigt eine transparente Matrix mit homogen verteilt auftretenden, rundlichen Partikeln mit geringer Größenvarianz. Dieses Erscheinungsbild ist unabhängig von den UV-Stabilisatoren zu beobachten. Es liegt nahe, dass es sich nicht um Additivagglomerate handelt, sondern Bestandteile des Überzuges sind. Da es sich bei dem verwendeten Produkt um ein Fertigprodukt handelt, das vom Hersteller als „seidenmatt“ beschrieben wird, liegt die Vermutung nahe, dass die Partikel zur gezielten Glanzreduktion beigefügt wurden.³⁰⁹ Diese Interpretation wird dadurch gestützt, dass in den zugehörigen Datenblättern der Einsatz von Additiven deklariert ist.³¹⁰

5.2 Farbwertmessungen

In diesem Kapitel wird die mithilfe instrumenteller Farbwertmessungen quantitativ erfasste Farbigkeit der Probefilme beschrieben und ausgewertet. Im Gegensatz zur visuellen Beurteilung liefern die Messungen objektive, zahlenbasierte Ergebnisse, die eine wiederholbare Vergleichbarkeit zwischen ungealtertem und künstlich gealtertem Zustand ermöglichen. Für jede Überzug-Additiv-Kombination werden insgesamt Einzelmessungen $n = 9$ durchgeführt. Aus diesen Messwerten werden jeweils Mittelwerte der Farbwerte und Standardabweichung berechnet. Die Mittelwerte dienen als repräsentativer Kennwert für die jeweilige Probengruppe, während die Standardabweichung Hinweise auf die Streuung der Messwerte und damit auf die Homogenität der Filme beziehungsweise die Messunsicherheit innerhalb der Gruppe gibt.

Wenn sich bei zwei Messgruppen die Bereiche „Mittelwert $\pm$ Standardabweichung“ überlappen, kann daraus nicht sicher geschlossen werden, dass sich die Farbigkeit der Filme tatsächlich

³⁰⁹ Vgl. MASKERY 1973.

³¹⁰ siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“

unterscheidet. Ein Unterschied ist dann statistisch grundsätzlich nicht eindeutig belegt und kann (je nach Streuung) auch durch Mess- bzw. Probenvariabilität erklärbar sein. Wie belastbar eine dennoch vorgenommene Tendenzaussage ist, hängt vom Ausmaß der Überlappung ab: Eine geringe Überlappung bei gleichzeitig deutlich getrennten Mittelwerten spricht eher für einen realen Unterschied, während eine starke Überlappung auf eine geringe Trennschärfe hinweist und Unterschiede entsprechend nur vorsichtig interpretierbar sind.

Die Bewertung des Degradationsgrades der Überzug-Additiv-Gruppen erfolgt primär über den Vergleich der Farbdaten vor und nach der künstlichen photochemischen Alterung. Die Stärke der Farbveränderung wird anhand der Farbdifferenzen (siehe 4.4.2 Farbwertmessungen) beurteilt. Grundsätzlich gilt, dass größere Farbdifferenzen auf ausgeprägtere optische Veränderungen und damit auf intensiver ablaufende Alterungsprozesse hinweisen können.

Die Messwerte der Regalrez®-1126- und der Nitrocelluloselack-Gruppen weisen grundsätzlich sowohl im Vor- als auch im Nachzustand geringe bis sehr geringe Standardabweichungen auf. Diese geringen ortsabhängigen Farbunterschiede sprechen für eine weitgehend homogene Filmbildung. Entsprechend sind die ermittelten Mittelwerte dieser Gruppen als recht stabil und gut im Rahmen der verwendeten Methodik reproduzierbar zu bewerten. Außerdem können beim Vergleich der Farbwerte der Proben-Gruppen innerhalb des Überzugssystem keine zusatzabhängigen Unterschiede festgestellt werden. Die Zusätze haben scheinbar keine Wirkung auf die Eigenfarbe des Überzuges und weisen auch selbst keine Farbigkeit auf.

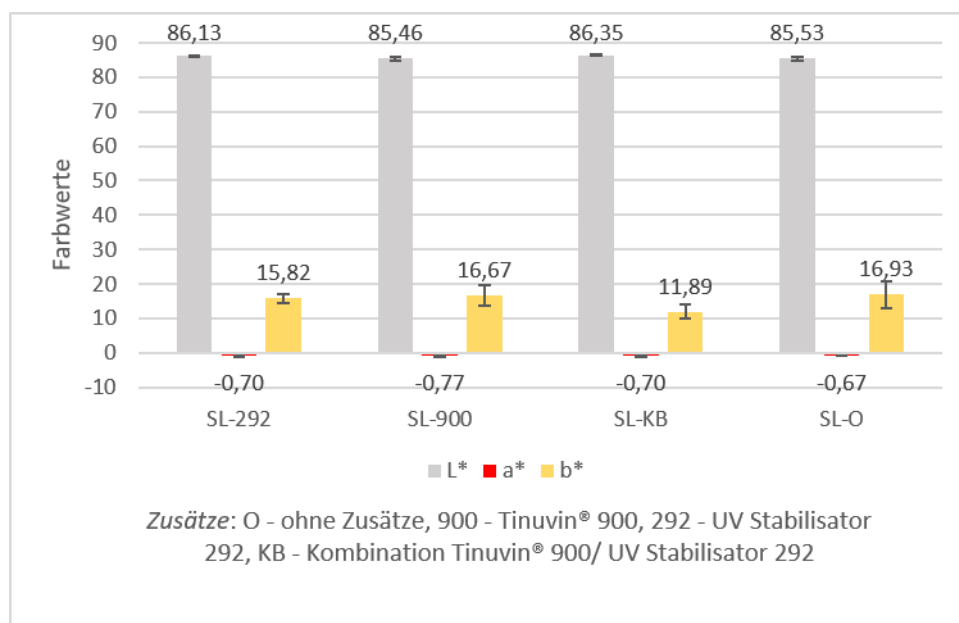


Abbildung 23 Diagramm: Mittelwerte und Standardabweichung der Farbwerte der Schellackprobefilme im Vorzustand, n=9

Demgegenüber zeigen die Schellack-Gruppen bereits im ungealterten Zustand bei den b^* -Werten (Gelb–Blau-Achse) verschiedene Mittelwerte mit deutlich größeren Streuungen ($\pm 1,30$ bis $\pm 3,97$) (siehe Abb. 23). Diese erhöhte Standardabweichung deutet auf eine Variabilität der Gelbanteile innerhalb der Proben hin. Als Ursachen könnte die im Vergleich mit den anderen erprobten Überzugssystemen stärkere Grundfarbigkeit des Schellacks gesehen werden, welche schon bei kleineren Schichtdickenunterschieden einen höheren Einfluss auf die Farbigkeit des Films hat und dadurch zu einer erhöhten Streuung der (b^* -)Farbwerte führen könnte. Dies weist darauf hin, dass die Schellack-Probefilme eher eine stärkere Inhomogenität aufweisen, als dass die Zusätze die Farbigkeit des Schellacks beeinflussen.

Schellack

Bei den Schellackfilmen weisen die gemessenen Farbwerte insgesamt hohe L^* -Werte auf, was vor dem Hintergrund des vorhandenen Transparenzgrades der Überzüge zu interpretieren ist. Ein wesentlicher Anteil der gemessenen Helligkeit ist auf den weißen Referenzuntergrund zurückzuführen (siehe 4.4.2 Farbwertmessungen). Gleichzeitig zeigt sich in den Farbkoordinaten vor allem eine ausgeprägte Verschiebung in Richtung positiver b^* -Werte, sodass die gelbe Eigenfärbung der Schellackfilme als dominierender Farbeindruck quantitativ erfasst wird.

Nach der künstlichen photochemischen Alterung zeigen alle Additiv-Gruppen eine Veränderung der Farbwerte gegenüber dem Ausgangszustand (siehe Abb. 24). Dabei ist eine einheitliche Tendenz erkennbar. Die L^* -Werte steigen, während a^* - und b^* -Werte abnehmen. Dies ist als allgemeine Aufhellung und Verschiebung zu geringeren Rot- und Gelbkomponenten beziehungsweise insgesamt geringerer Farbsättigung zu beschreiben. Die Standardabweichungen sind in den jeweiligen Gruppen im Vor- und Nachzustand ähnlich groß, was darauf hindeutet, dass sich die Streuung der Messwerte durch die Alterung nicht grundsätzlich verändert hat und die Messreihen in beiden Zuständen vergleichbar präzise sind. Die konkreten Farbverschiebungen und Farbabstände sind in Abbildung 25 anschaulicher dargestellt. Die Stärke der Farbveränderung (siehe 4.4.2 Farbwertmessungen) unterscheidet sich jedoch in Abhängigkeit vom zugesetzten Stabilisator. Proben mit dem HALS UV-Stabilisator 292 weisen insgesamt größere Farbabstände zwischen Vor- und Nachzustand auf als die Vergleichsproben ohne Zusatz. Die ausgeprägteren Unterschiede zeigen sich dabei konsistent über alle Farbachsen hinweg. Dies deutet darauf hin, dass in diesen Probefilmen Alterungsprozesse die zu Veränderungen der Farbigkeit führen stärker abliefen, wobei dies in Zusammenhang zum beigesetzten Stabilisator zusetzen ist. Demgegenüber zeigen die Proben mit dem UV-Absorber Tinuvin® 900 und mit der Zusatz-Kombination tendenziell geringere

Farbabstände als die Vergleichsgruppe ohne Additiv. Dies kann als Hinweis interpretiert werden, dass diese Zusätze die Degradation farbiger Inhaltsstoffe stärker inhibieren und damit die optische Veränderung reduzieren.

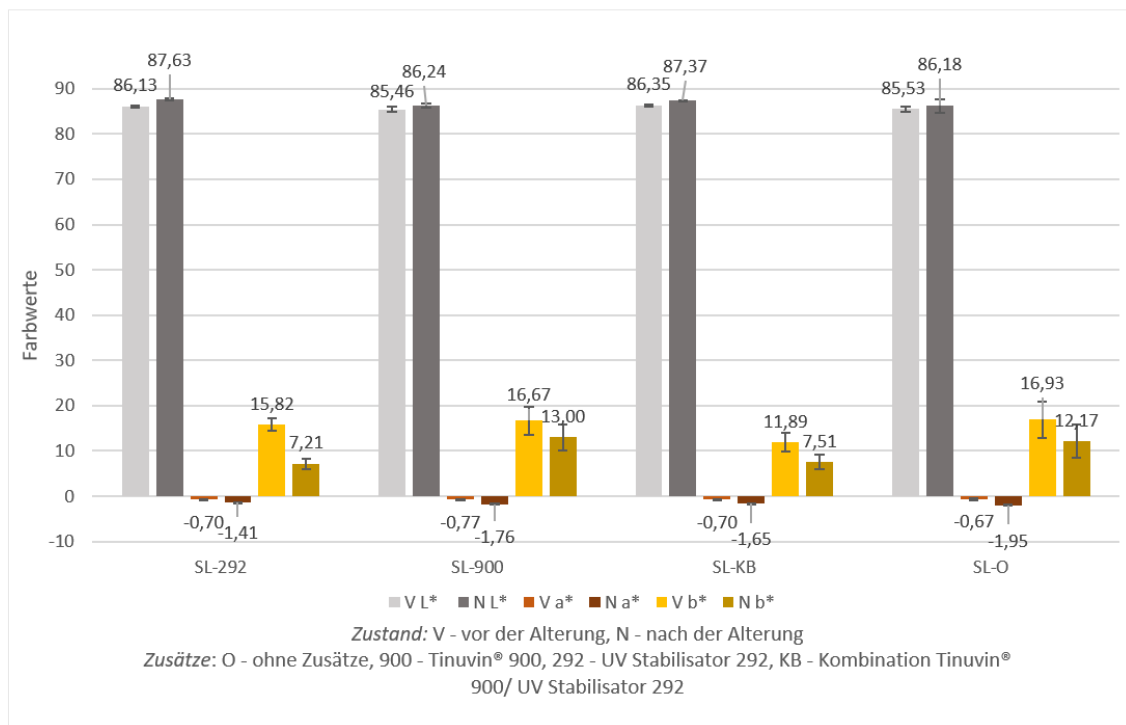


Abbildung 24 Mittelwerte und Standardabweichung der Farbwerte der Schellackprobenfilme im Vor- und Nachzustand, n=9

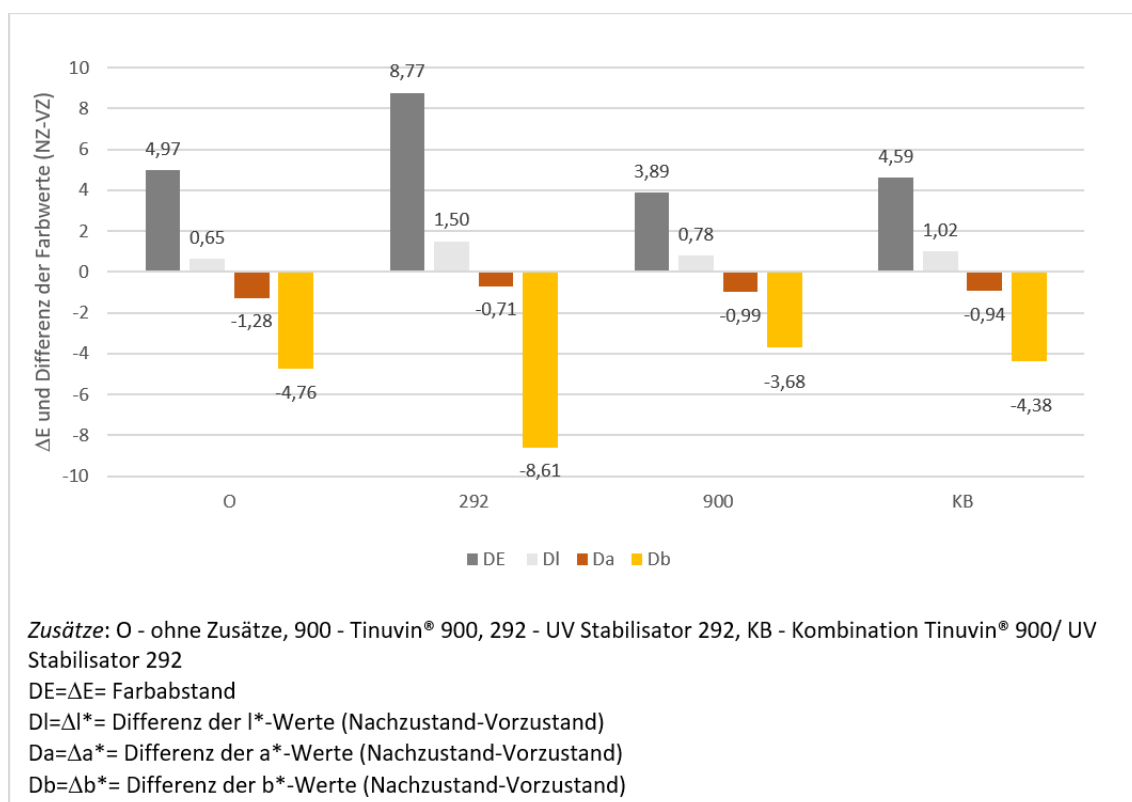


Abbildung 25 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Schellackprobenfilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9

Regalrez®-1126

Die Farbwerte des weißen Untergrundes (siehe 4.4.2 Farbwertmessungen) werden separat bestimmt ($n = 10$) und im Mittelwert als Referenzgröße verwendet. Die Regalrez®-1126 -Proben ohne Zusatz zeigen gegenüber dem Untergrund einen sehr geringen Farbabstand $\Delta E = 0,14$ (siehe Abb. 26) und können damit im Ausgangszustand als optisch praktisch vollständig transparent bewertet werden (siehe 4.4.2 Farbwertmessungen).

Referenz: weißer Untergrund n=9				Regalrez 1126, ohne Zusatz, Vorzustand, n=9			
	L*	a*	b*		L*	a*	b*
Mittelwert	90,56	-0,35	-1,50	Mittelwert	90,41	-0,30	-1,40
Standardabweichung	0,25	0,06	0,13	Standardabweichung	0,11	0,01	0,05

Abbildung 26 Mittelwert und Standardabweichung der Farbwerte des Untergrundes des Versuchsaufbau bei der Farbwertmessung und der Regalrez® 1126-Proben ohne Zusatz

Nach der künstlichen photochemischen Alterung weisen alle Gruppen Veränderungen der Farbwerte gegenüber dem Vorzustand auf (siehe Abb. 27). Die L*-Werte bleiben nahezu konstant, während die a*-Werte abnehmen und die b*-Werte zunehmen, wobei die Verschiebung auf der b*-Achse am ausgeprägtesten ist. Dieses Muster ist als Vergilbung aller Probefilme zu interpretieren. Die Standardabweichungen der Farbwerte sind innerhalb der jeweiligen Gruppen im Vor- und Nachzustand nur geringfügig größer geworden, was darauf hindeutet, dass die Streuung der Messwerte durch die Alterung nicht wesentlich beeinflusst werden und die Messreihen in beiden Zuständen eine ähnliche Präzision aufweisen.

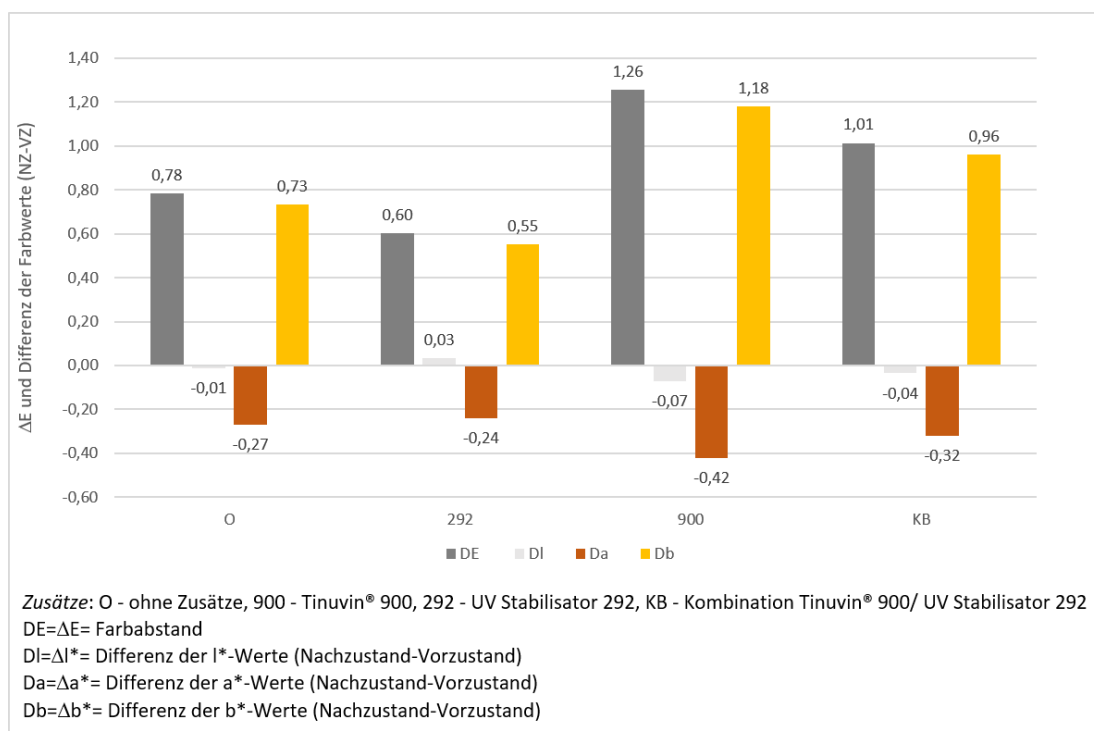


Abbildung 27 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Regalrez 1126-Probefilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9

Im Vergleich der Gruppen zeigen die Proben mit dem Zusatz des UV-Stabilisator 292 die geringste Farbdifferenz zum Vorzustand. Diese liegt zudem unter derjenigen der Referenzproben ohne stabilisierenden Zusatz. Demgegenüber weisen die Proben mit Tinuvin® 900 und mit der Kombination beider Zusätze im gealterten Zustand größere Farbabstände auf als die Referenzprobe. Das lässt darauf schließen, dass diese Zusätze unter den gewählten Bedingungen keine Reduktion der altersungsbedingten Farbänderung bewirken, beziehungsweise additiv- oder wechselwirkungsbedingte Einflüsse die optische Veränderung zusätzlich verstärken können.

Nitrocelluloselack

Der Farbabstand der Referenzproben ohne Additiv gegenüber den Referenzmessungen des Untergrundes beträgt im Ausgangszustand vor der künstlichen Alterung $\Delta E = 2,41$ und ist damit als geringer bis mittlerer Farbunterschied einzuordnen (siehe Abb. 28).

Referenz: weißer Untergrund n=9				Nitrocelluloselack, ohne Zusatz, Vorzustand, n=9			
	L*	a*	b*		L*	a*	b*
Mittelwert	90,56	-0,35	-1,50	Mittelwert	88,79	-0,65	0,49
Standardabweichung	0,25	0,06	0,13	Standardabweichung	0,08	0,06	0,39

Abbildung 28 Mittelwert und Standardabweichung der Farbwerte des Untergrundes des Versuchsaufbau bei der Farbmessung und der Nitrocellulose-Proben ohne Zusatz

Nach der künstlichen Alterung zeigen alle Probekörper einen Farbunterschied zum Ausgangszustand (siehe Abb. 29). Die Veränderungen der einzelnen Farbkoordinaten verlaufen dabei bei allen Probengruppen unabhängig des Zusatzes gleichgerichtet: L*- und a*-Werte nehmen leicht ab, während die b*-Werte im Vergleich deutlich zunehmen. Insgesamt weist dieses Muster auf eine Gelbfärbung beziehungsweise Vergilbung der Filme hin. Auffällig ist, dass die im Ausgangszustand geringen Standardabweichungen im Nachzustand leicht ansteigen. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die mit der Alterung zunehmende Farbintensität vorhandene Inhomogenitäten der Filme stärker sichtbar macht und dadurch die Streuung der Messwerte erhöht.

Im Gruppenvergleich zeigen die Proben mit dem Zusatz des HALS UV-Stabilisator 292 die geringste Farbdifferenz zum Vorzustand, die zudem unter derjenigen der Referenzprobe ohne stabilisierenden Zusatz liegt. Demgegenüber weisen die Proben mit Tinuvin® 900 und die Kombination beider Zusätze im gealterten Zustand größere Farbabstände auf als die Referenzproben ohne Zusätze. Dies lässt darauf schließen, dass diese Zusätze unter den gewählten Bedingungen keine Reduktion der alterungsbedingten Farbänderung bewirken beziehungsweise zusatz- oder wechselwirkungsbedingte Effekte die optische Veränderung zusätzlich verstärken können.

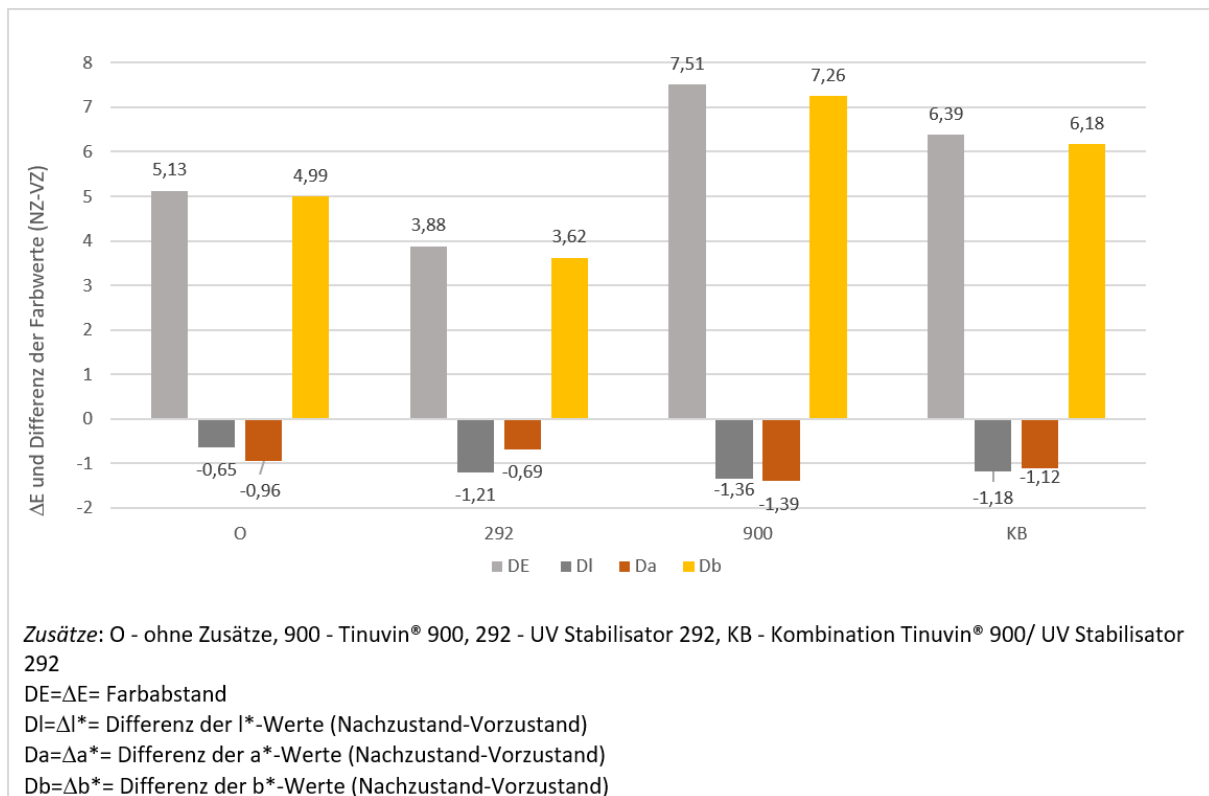


Abbildung 29 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Nitrocelluloselack-Probefilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9

Die Farbwertmessungen belegen für alle untersuchten Überzug-Additiv-Kombinationen nach der künstlichen photochemischen Alterung messbare Farbveränderungen gegenüber dem Ausgangszustand. Die stärksten Veränderungen treten bei Schellack auf, die geringsten bei Regalrez®-1126. Innerhalb der jeweiligen Überzugssysteme zeigt sich zudem ein additivabhängiges Verhalten. Bei Schellack führt der Zusatz des HALS UV-Stabilisator 292 zu größeren Farbdifferenzen als in der Referenz ohne Zusatz, während sich bei den Proben mit Tinuvin® 900 und mit der Kombination beider Zusätze geringere Farbunterschiede ergeben. Für Regalrez®-1126 und dem Nitrocelluloselack zeigt sich eine gegenteilige Tendenz, da die Proben mit dem UV-Stabilisator 292 die alterungsbedingte Farbänderung eher reduziert, mit Tinuvin® 900 und der Kombination hingegen größeren Farbabstände aufweisen. Als mögliche Erklärung kommen materialspezifische Wechselwirkungen zwischen Additiv und Überzugsmaterialität oder eine Eigenalterung des UV-Absorbers Tinuvin® 900 in Betracht, bei der farbige Degradationsprodukte entstehen. Vor diesem Hintergrund ist für Schellack zu berücksichtigen, dass das dort beobachtete geringere Ausbleichen bei den Tinuvin®-900-haltigen Proben in einer „Kompensation“ der durch photochemische Alterung bedingten Verringerung der Farbintensität durch eine gegenläufige additiveigene Gelbfärbung begründet sein könnte.

5.3 Glanzwertmessungen

In diesem Kapitel wird der Glanzgrad der Probefilme anhand instrumenteller Messungen quantitativ erfasst, beschrieben und ausgewertet.

Der Glanz ist eine oberflächengebundene Eigenschaft und beschreibt primär den optischen Zustand der unmittelbar exponierten Filmoberfläche.^{311 312} Damit liefert er insbesondere Hinweise darauf, wie sich die äußere Schicht der Überzüge unter der künstlichen photochemischen Alterung verändert, also jener Bereich, der der UV-Strahlung direkt ausgesetzt ist und in dem deshalb durch Umwelteinflüsse induzierte Alterungsprozesse häufig zuerst auftreten. Veränderungen des Glanzgrades können dabei auf gegebenenfalls photochemisch induzierte Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit oder Oberflächennaher Schichten hindeuten. Im Gegensatz zur visuellen Beurteilung liefern die Messungen objektive, zahlenbasierte Ergebnisse, die eine wiederholbare Vergleichbarkeit zwischen ungealtertem und künstlich gealtertem Zustand ermöglichen. Durch den Vergleich der Glanzgrade der jeweiligen Überzug-Additiv-Kombinationen im Vor- und Nachzustand werden alterungsbedingte Veränderungen quantitativ dargestellt. Diese Glanzdifferenzen können als Indikator für photochemisch induzierte Degradationsprozesse an der Filmoberfläche herangezogen werden und dienen damit gegebenenfalls als Bewertungsgrundlage für die Wirksamkeit der eingesetzten Additive zur Stabilisierung der Überzüge.

Für jede Überzug-Additiv-Kombination werden insgesamt Einzelmessungen $n = 9$ durchgeführt. Aus diesen Messwerten werden jeweils Mittelwerte der Farbwerte und Standardabweichung als Kenngrößen berechnet. Zur Aussagekraft und zu den Limitationen dieser statistischen Kenngrößen wird an dieser Stelle auf Kapitel 5.2 Farbwertmessungen verwiesen.

Die Proben auf Basis von Schellack und Nitrocelluloselack weisen beim Standardmesswinkel von 60° Glanzwerte zwischen 10 und 70 GU auf und werden daher gemäß der üblichen Einteilung mit dieser Messeinstellung beurteilt (siehe 4.4.3 Glanzwertmessungen). Regalrez® 1126 zeigt dagegen bei 60° Glanzwerte deutlich über 70 GU und ist somit als hochglänzend einzustufen. Entsprechend wird für die Messung der Regalrez® 1126-Proben der Messwinkel von 20° verwendet, um im Hochglanzbereich eine höhere Differenzierungsfähigkeit der Messung zu gewährleisten.³¹³

³¹¹ Vgl. KIPPAN 2000, S. 114.

³¹² Vgl. LÜBBE 2013, S. 154.

³¹³ Vgl. RHOPPOINT INSTRUMENTS GMBH 2026.

Über alle Überzugssysteme hinweg zeigen die Glanzmessungen recht große Standardabweichungen, was auf eine deutliche Streuung der Einzelwerte hinweist. Die Höhe dieser Streuung ist jedoch innerhalb der jeweiligen Systeme zwischen den Additivgruppen nicht durchgängig gleich ausgeprägt (besonders deutlich bei Schellack, aber auch bei Regalrez® 1126). Dies spricht dafür, dass die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Probefilme nicht vollständig homogen ist und je nach Additiv unterschiedlich stark variiert. Zudem überlappen die Standardabweichungen der Vor- und Nachzustandsmessdaten der einzelnen Überzug-Additiv-Gruppen. Entsprechend sollten die Mittelwerte primär als Trendindikatoren interpretiert werden, während die Streuung als Hinweis auf eine ausgeprägte, additivabhängige Oberflächenheterogenität zu berücksichtigen ist.

Schellack

Bei den Schellackproben fällt für die Gruppe mit Zusatz des UV-Stabilisators 292 bei den Messungen des Vorzustandes ein deutlich abweichender Glanzgrad auf. Während die drei übrigen Gruppen ungefähr bei 36 GU mit zum Teil großen Standardabweichungen liegen, weicht die Gruppe mit dem Zusatz des UV-Stabilisator 292 um mehr als 22 GU ab und weist zudem eine sehr geringe Streuung der Messdaten auf (siehe Abb. 30). Auch im Nachzustand werden für diese Gruppe erhöhte Glanzwerte gemessen, sodass die Ursache kritisch zu prüfen ist. Denkbar ist zum Beispiel eine wiederholt nicht exakte Positionierung der Messöffnung oder ein teilweises Mitmessen des hochglänzenden, unbeschichteten Glasträgers am Probenrand, ein Herstellungsfehler oder eine tatsächliche, additivbedingte Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit. Die Aussagekraft dieser Messreihe ist deshalb nur mit Vorsicht zu bewerten.

Über alle Schellack-Probengruppen hinweg ist nach der photochemischen Alterung ein genereller Trend zu einem leicht verminderten Glanz erkennbar (siehe Abb. 30). Die größte Glanzdifferenz zeigen dabei die Proben mit Tinuvin® 900, gefolgt von der Kombination der Zusätze, anschließend den Referenzproben ohne Zusatz. Die geringste Veränderung tritt bei den Proben mit dem Zusatz von UV-Stabilisator 292 auf. Aufgrund der zum Teil großen und zwischen den Gruppen variierenden Standardabweichungen lassen sich aus den Glanzdaten jedoch keine eindeutigen Aussagen zur Wirksamkeit der Stabilisatoren ableiten.

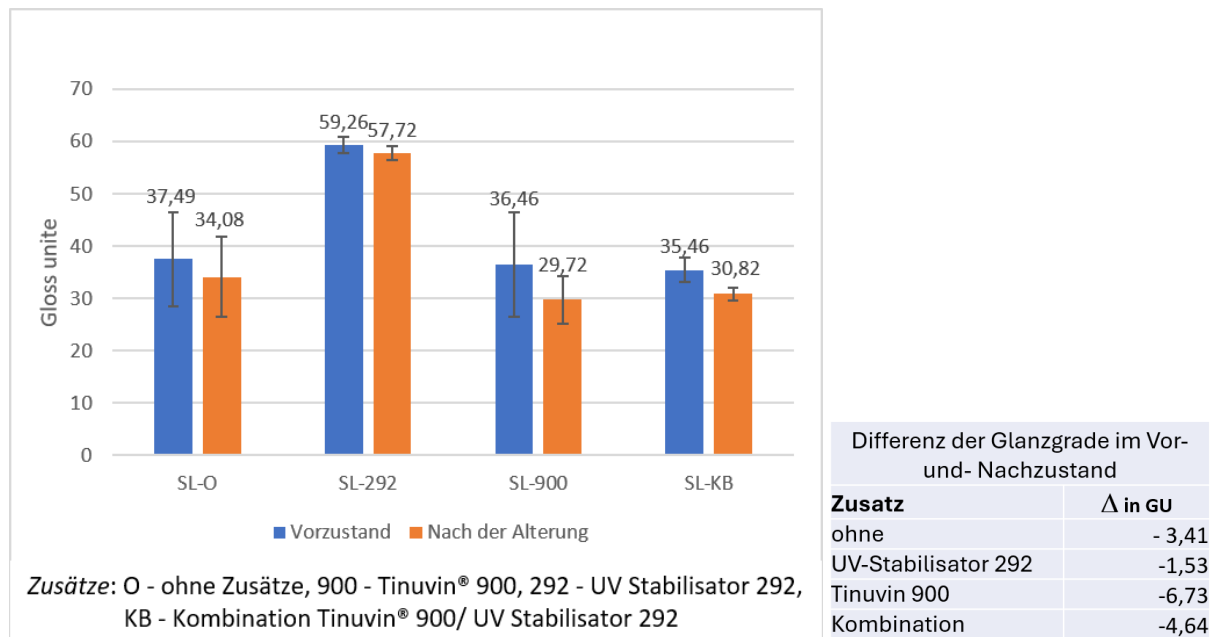


Abbildung 30 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Schellackproben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Werte der einzelnen Additiv-Gruppen, $n=9$

Regalrez® 1126

Bei den Regalrez® 1126-Proben fällt für die Gruppe mit Zusatz des UV-Stabilisators 292 bei den Messungen des Vorzustandes eine gering abweichender Glanzgrad auf (siehe Abb. 31). Während die drei übrigen Gruppen einen Mittelwert von ungefähr 158 GU aufweisen, weicht die Gruppe mit dem Zusatz des UV-Stabilisator 292 um 4 GU ab. Letztere weist jedoch eine größere Standardabweichung auf, wodurch der abweichende Mittelwert in der Streuung der Messwerte begründet sein kann. Bei den Proben mit Zusatz des UV-Stabilisators 292 zeigt sich nach der Alterung ein geringfügiger Anstieg des Glanzgrades, während die drei übrigen Probenvarianten einen leichten Rückgang der Glanzwerte aufweisen. Diese Veränderungen liegen jedoch lediglich im Nachkommabereich (siehe Abb. 31). Vor dem Hintergrund der insgesamt großen Streuung der Messwerte sind daraus keine belastbaren Aussagen ableitbar. Selbst eine Trendtendenz ist daher nur mit Vorsicht zu bewerten.

Nitrocelluloselack

Nach der künstlichen Alterung zeigen die Mittelwerte aller Messgruppen des Nitrocelluloselacks tendenziell einen leicht erhöhten Glanzgrad. Im Vergleich der Additivvarianten ist die größte Mittelwertänderung bei den Proben ohne Zusatz zu beobachten, gefolgt von den Proben mit UV-Stabilisator 292. Bei dem Zusatz Tinuvin® 900 und bei der Kombination der Zusätze fallen die Unterschiede sehr gering aus und liegen jeweils unter 1 GU (siehe Abb. 32) Insgesamt bewegen sich die Veränderungen lediglich im Nachkommabereich, sodass vor dem Hintergrund der insgesamt

großen Streuung der Messwerte keine belastbaren Aussagen ableitbar sind. Die Standardabweichungen sind im gealterten Zustand tendenziell etwas größer. Mit Ausnahme der Proben ohne Zusatz überlappen die Standardabweichungen der gealterten Messungen die Streuung des Vorzustands in den übrigen Gruppen vollständig, was die geringe Trennschärfe der beobachteten Mittelwertunterschiede zusätzlich unterstreicht.

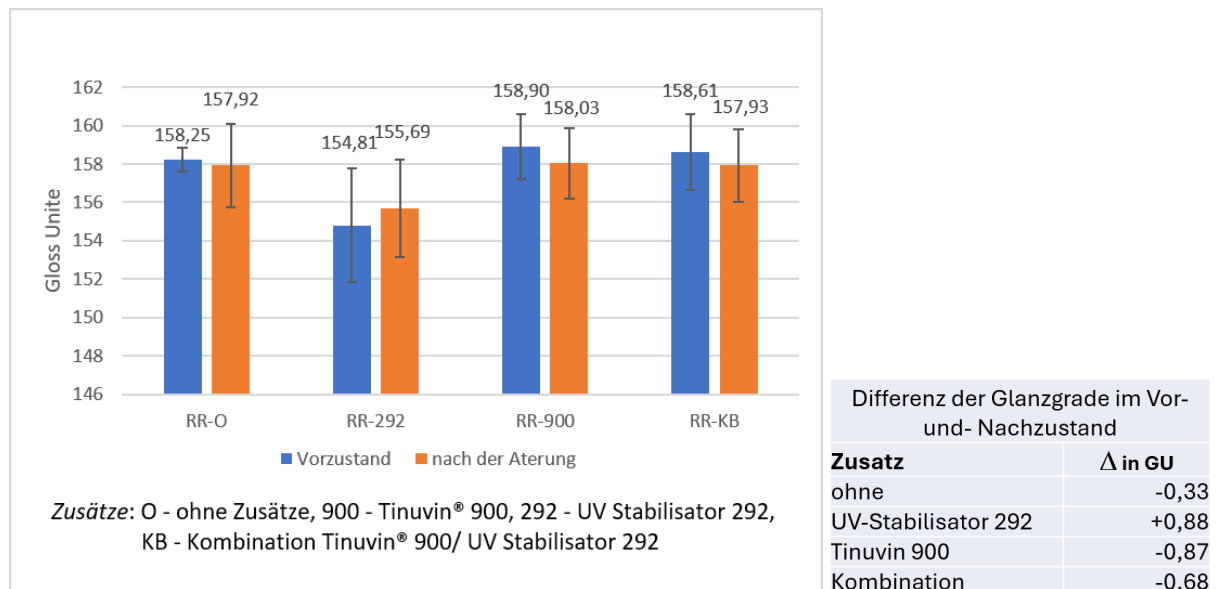


Abbildung 31 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Regalrez 1126-Proben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Werte der einzelnen Additiv-Gruppen, n=9

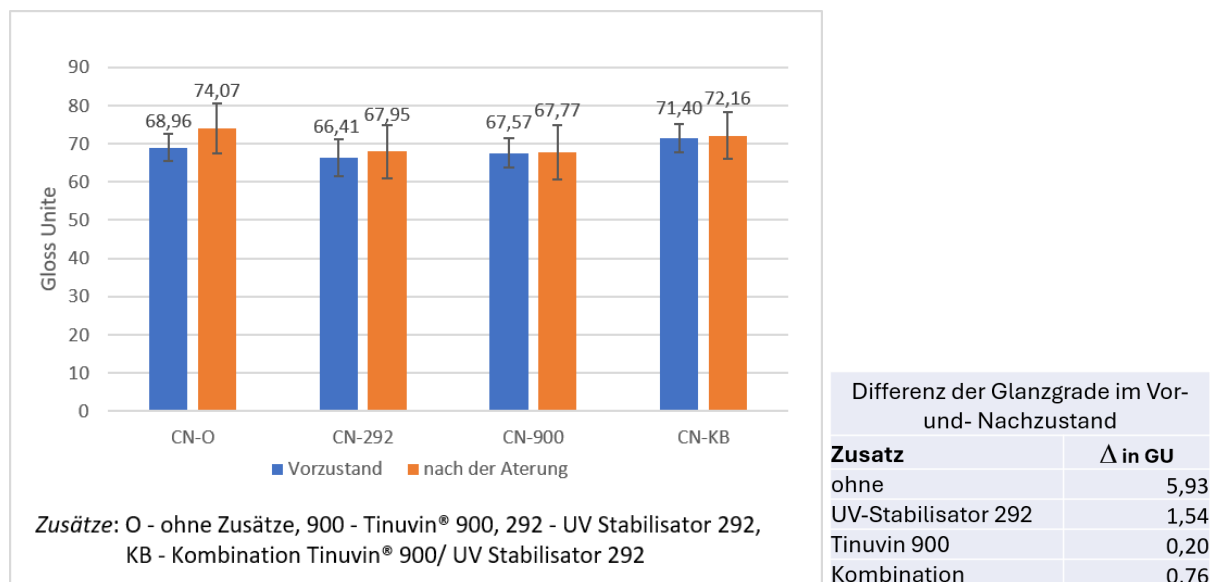


Abbildung 32 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Nitrocellulose-lack-Proben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Mittelwerte der einzelnen Additiv-Gruppen, n=9

Die bei den Nitrocelluloselack-Proben beobachtete Tendenz der erhöhten Glanzwerte im gealterten Zustand unterscheidet sich zu den anderen beiden erprobten Überzugssystemen. Die Glanzzunahme ist geringer bei den Proben mit Tinuvin 900 sowie bei der angegebenen Zusatzkombination. Die Glanzzunahme ist geringer bei den Proben mit Tinuvin 900 sowie bei der angegebenen Zusatzkombination. Unter Einbezug theoretischer Aspekte ist zu berücksichtigen, dass bei dem Zusatz des UV-Absorber Tinuvin® 900 eine stabilisierende Wirkung auf die Überzugsmaterialität erst ab einer gewissen Filmtiefe zu erwarten ist. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Ergebnisse erscheint daher naheliegend, dass die Messergebnisse nicht für eine stabilisierende Wirkung des Tinuvin® 900 sprechen kann. Unter Berücksichtigung der Tendenz, dass die Proben auf Basis von Schellack und Regalrez®-1126 mit Tinuvin® 900 stärker an Glanz verlieren als die Referenzproben ohne Zusatz, liegt die Vermutung nahe, dass Tinuvin® 900 selbst photochemisch abbaut. Dabei könnten Abbauprodukte entstehen, die zu einer Glanzminderung beitragen.

Für die Proben mit UV-Stabilisator 292 ist im systemübergreifenden Vergleich keine eindeutige Gesamttendenz erkennbar. Bei den Schellack- und Nitrocelluloseproben ist eine geringere Veränderung der Glanzwerte zu beschreiben. Hingegen geht bei den Proben auf Basis von Regalrez® 1126 bei dem Zusatz von UV-Stabilisator 292 eine den Referenzproben entgegengesetzte Veränderung der Glanzwerte aus den Messwerten hervor. Das schließt eine Wirkung nicht aus, vielmehr ist angesichts der hohen Streuung der Messwerte und der insgesamt geringen Differenzen und-unterschiede (häufig im Nachkommabereich) zu betonen, dass die Ergebnisse der Glanzwertmessungen maximal als Tendenzen zu werten sind und keinen eindeutigen Nachweis darstellen.

5.4 Versuche zum Löslichkeitsverhalten

Ziel der Versuche zum Löslichkeitsverhalten ist es, mögliche alterungsbedingte Veränderungen der Löslichkeit zu erfassen und diese über eine Quantifizierung der gelösten Überzugsmenge auszuwerten. Die Versuche zum Löslichkeitsverhalten werden zunächst an den Proben auf Schellackbasis durchgeführt. Bereits in dieser ersten Untersuchungsphase zeigt sich jedoch, dass keine bewertbaren Veränderungen darstellbar sind. Als wesentliche Ursache hierfür ist die begrenzte Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung in der Praxis zu sehen. Insbesondere Variationen in der Tropfengröße beim Lösemittelauftrag, die Inhomogenität der Probenoberflächen und Unterschiede im Benetzungs- und Ausbreitungsverhalten der Lösemitteltropfen führen zu methodisch bedingten Ungenauigkeiten. Schon diese erste Messreihe macht deutlich, dass die angestrebte Quantifizierung der gelösten Überzugsmenge für die Beantwortung der Fragestellung nicht ausreichend aussagekräftig ist. Vor diesem Hintergrund

wird diese Versuchsreihe nicht weitergeführt, da der notwendige zusätzliche Aufwand in keinem angemessenen Verhältnis zur erwartbaren Erkenntnis steht und die Methodik für die Fragestellung als nur eingeschränkt geeignet ist.

Als weiterführender Ansatz zur Untersuchung alterungsbedingter Veränderungen mittels der ATR-FTIR-Spektroskopie wäre stattdessen eine materialanalytische Charakterisierung sinnvoll. Über den Vergleich charakteristischer Banden funktioneller Gruppen könnten strukturelle Veränderungen anhand von Veränderungen in den Messungen aufgrund von Degradationsprodukten beschrieben werden. Eine solche Untersuchung liegt jedoch außerhalb des Umfangs dieser Arbeit.

5.5 Vergleichende Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Evaluationskriterien zusammengeführt, um eigenschaftsübergreifende Veränderungen der Probekörper zu erfassen und im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit zu interpretieren. Im Mittelpunkt steht die Beständigkeit der mit stabilisierenden Zusätzen (Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292) versetzten Überzugssysteme Schellack, Regalrez® 1126 und Nitrocelluloselack gegenüber UV-induzierter Alterung. Berücksichtigt werden die Befunde der subjektiven Verfahren (makroskopische Betrachtung unter VIS- und UV-Strahlung), die mikroskopischen Untersuchungen und die objektiv ermittelten quantitativen Ergebnisse aus Farb- und Glanzwertmessungen. Die angewandte Methodik der Löslichkeitsversuche erwies sich für die Beantwortung der zugrunde liegenden Fragestellung als nicht geeignet. Die Bewertung erfolgt damit primär auf Grundlage optisch wahrnehmbarer Veränderungen.

Es konnte eine leichte Erhöhung der Temperatur (+5 K) einhergehend mit einer Verringerung der relativen Luftfeuchte auf ca. 30 % (± 3 %) während der künstlichen Alterung dokumentiert werden.³¹⁴ was auf die Wärmeentwicklung der UV-Quelle zurückzuführen ist. Da hierbei keine ausgeprägten Schwankungen beobachtet wurden, wird dieser Einflussfaktor bei der Betrachtung der Degradationsprozesse nicht gesondert berücksichtigt.

Innerhalb der jeweils betrachteten Gruppen (Überzug-Additiv-Kombination) erscheinen die Veränderungen über die angewandten Evaluationsmethoden hinweg grundsätzlich konsistent. Gleichzeitig zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in der Aussagekraft der einzelnen Evaluationsmethoden. Da die Messwerte nur eine geringe Streuung aufweisen,³¹⁵ liefern die

³¹⁴ 8 Anhang: 8.3 Umgebungsbedingungen während der UVC-Alterung

³¹⁵ bei Schellackproben bis zu $\pm 3,98$, bei Regalrez® 1126-Proben bis zu $\pm 2,97$, bei Proben des Nitrocelluloselackes bis zu $\pm 1,30$

Farbwertmessungen die eindeutigsten und bewertbarsten Ergebnisse. Die makroskopische Beurteilung ist ebenfalls aussagekräftig, bleibt jedoch stärker subjektiv. Die Glanzmessungen sind aufgrund der höheren Streuung der Messwerten³¹⁶ am stärksten eingeschränkt und werden daher primär ergänzend herangezogen, insbesondere zur Einordnung und Plausibilisierung der klareren Befunde aus Farbwertmessung und makroskopischer Beobachtung.

Im Folgenden wird zunächst ein Gesamtbild des Alterungsverhaltens der einzelnen Überzugssysteme bei der UVC-induzierten Degradation gezeichnet und darauffolgend Unterschiede in der Beständigkeit der einzelnen Messgruppen herausgearbeitet.

Zunächst sind vorab folgende Anmerkungen zum UV-Absorber Tinuvin® 900 zu treffen, die sich aus den erhobenen Befunden ableiten lassen: Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Tinuvin® 900 in den hier untersuchten Überzugssystemen unter den gewählten Alterungsbedingungen vermutlich keine ausreichende UV(C)-Beständigkeit aufweist. Die Farbwertmessungen und die makroskopische Betrachtung zeigen, dass bei Regalrez® 1126 und dem Nitrocelluloselack in Anwesenheit von Tinuvin® 900 eine Tendenz zu einem stärkeren Gelben der Überzüge vorhanden ist. Bei dem bei der Alterung ausbleichenden Schellack zeigen Proben mit zugesetztem Tinuvin® 900 (sowie die Kombinationsproben) hingegen eine geringere Neigung zum Ausbleichen, was als Stabilisierung der Degradationsprozesse interpretiert werden könnte. Eine materialabhängige Wechselwirkung beziehungsweise Inkompatibilität mit Regalrez® 1126 und Nitrocelluloselack bei einer stabilisierenden Wirkung im Schellack wäre als Erklärung für das beobachtete Phänomen prinzipiell denkbar. Vor dem Hintergrund der Absorptionseigenschaften (siehe 4.1.2 UV-stabilisierende Zusätze) des verwendeten UV-Absorbers Tinuvin® 900 ist jedoch wahrscheinlicher, dass dieser bei der in dieser Arbeit zur künstlichen photochemischen Alterung verwendeten Wellenlänge von 254 nm keine wirksame Schutzfunktion entfaltet und stattdessen selbst photochemisch degradiert. In diesem Fall könnte eine gelbe Färbigkeit der Degradationsprodukte des UV-Absorbers in den Messwerten als verstärkte Vergilbung beziehungsweise als scheinbar reduziertes Ausbleichen sichtbar werden. Dies würde die Messergebnisse sowie die beobachteten Tendenzen erklären.

In der Literatur wird zudem eine Unbeständigkeit von Benzotriazolen³¹⁷ gegenüber Oxidationsprodukten, insbesondere mit hohem Carbonylgruppen-Anteilen, bei Einfluss elektromagnetischer Strahlung beschrieben. Dieses Phänomen ist in Versuchen außerdem bei Überzügen mit grundsätzlich hohen Carbonylgruppenanteilen, wie in Dammarfirnissen

³¹⁶ bei Schellackproben bis zu $\pm 10,01$ GU, bei Regalrez® 1126-Proben bis zu $\pm 2,98$ GU, bei Proben des Nitrocelluloselackes bis zu $\pm 7,01$ GU

³¹⁷ dieser Substanzklasse ist auch das verwendete Tinuvin® 900 zuzuordnen; Vgl. BASF CORPORATION 2019b.

beobachtet worden.³¹⁸ Zudem wird explizit ein Gelbfärben von Benzotriazolen bei dem Vorhandensein von bestimmten Aminen oder Metallionen durch chemische Reaktionen oder komplexierende Prozesse beschrieben.³¹⁹ Ob derartige Reaktionen die im vorliegenden Versuch beobachteten Effekte verursachen, lässt sich mit den eingesetzten Methoden nicht verifizieren. Grundsätzlich ist eine chemische Veränderung des Absorbers jedoch plausibel.

Ergänzend ist zu beachten, dass die Glanzmessungen zwar nur eine eingeschränkte Aussagekraft haben, in der vergleichenden Auswertung dennoch darauf hindeuten, dass der Zusatz von Tinuvin® 900 im gealterten Zustand den Glanzgrad der Proben beeinflusst. Unter Berücksichtigung der Wirkungsweise als UV-Absorber (siehe 3.2 UV-Stabilisatoren) liegt es nahe, dass Tinuvin® 900 selbst photochemisch degradiert und dabei Degradationsprodukte entstehen, die mit einer Glanzminderung einhergehen (siehe 5.3 Glanzwertmessungen).

Eine wesentliche Limitation besteht darin, dass das verwendete Tinuvin® 900 nicht frisch beschafft, sondern aus einem Bestand mit unbekannter Lagerdauer entnommen wurde. Der Alterungszustand des Additivs vor Versuchsbeginn ist damit nicht nachvollziehbar. Dies schränkt die allgemeine Aussagekraft dieser Interpretation deutlich ein.

Für die nachfolgende zusammenfassende Bewertung der Beständigkeit der Überzugssysteme wird daher ausschließlich der HALS UV-Stabilisator 292 in Bezug auf eine potenzielle Stabilitätsverbesserung berücksichtigt. Die Varianten mit Tinuvin® 900 sowie die Kombinationsansätze werden nicht weiter einbezogen, da der Zusatz des Tinuvin® 900 die optischen Ergebnisse beeinflusst und damit eine eindeutige Zuordnung möglicher stabilisierender Effekte beeinträchtigt.

Die Überzugsfilme basierend auf **Schellack** zeigen bei der Alterung mit UV-C-Strahlung sowohl in der makroskopischen Betrachtung unter VIS-Licht als auch in den Farbwertmessungen ein deutliches Ausbleichen. Dies äußert sich in höheren Helligkeitswerten und in einer Abnahme der Intensität entlang der Farbachsen. Außerdem beginnen diese im gealterten Zustand bei Bestrahlung mit UV-Strahlung in einer gelb-orangen Farbe zu lumineszieren. Vergleichbare, optisch wahrnehmbare Veränderungen werden in der Literatur auch für UVA-Alterung beschrieben.³²⁰ Eine makroskopische Bewertung von Veränderungen des Glanzes ist nur eingeschränkt möglich. Die Glanzmessungen deuten jedoch im gealterten Zustand tendenziell auf einen geringeren Glanz hin.

³¹⁸ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 15.

³¹⁹ Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27.

³²⁰ Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014, S. 77f.

Der Zusatz des HALS-UV-Stabilisators 292 führt bei Schellack zu einem insgesamt uneinheitlichen Bild. Einzelne Befunde, insbesondere eine geringere Veränderung der Glanzwerte im gealterten Zustand im Vergleich mit den Referenzproben, könnten auf eine stabilisierende Wirkung hindeuten. Demgegenüber zeigen jedoch sowohl die makroskopische Beobachtung als auch die Farbwertmessungen, dass die Proben mit UV-Stabilisator 292 stärker ausbleichen als die Referenzproben ohne Zusatz. Dies könnte als Hinweis auf eine beschleunigende Wirkung auf den Abbau farbgebender Bestandteile oder auf eine spezifische Wechselwirkung des Zusatzes mit dem Schellack interpretiert werden. Diese Beobachtung wird jedoch bei Bestrahlung von mit Tinuvin® 292 versetzten Schellackfilmen nicht beschrieben.³²¹ Inwieweit diese Abweichung auf eine wellenlängenabhängige Reaktionsführung zurückzuführen ist, erfordert jedoch vergleichende Alterungsversuche unter definierten Spektralbereichen bei gleicher Bestrahlungsdosis.

Unter UV-Beleuchtung wird bei den Proben mit UV-Stabilisator 292 eine geringere Lumineszenzintensität im Vergleich zu den Referenzproben ohne Zusatz festgestellt. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Stabilisator zumindest jene Degradationsprozesse positiv beeinflusst, die zur Bildung UV-luminiszierender Verbindungen beitragen.

Bei der Interpretation ist einzubeziehen, dass die Glanzwerte aller Proben mit dem Zusatz des HALS UV-Stabilisator 292 bereits im Ausgangszustand konsistent von den Werten der anderen Messgruppen abweichen. Obwohl weder die Farbwertmessungen noch die makroskopische Betrachtung Unterschiede zwischen den Messgruppen erkennen lassen, muss die Möglichkeit eines herstellungsbedingten Einflusses (z. B. Inhomogenität, Fehlmischung oder Verunreinigung des Gebindes) mit einbezogen werden. Insgesamt lässt sich für Schellack auf Basis der vorliegenden Daten keine eindeutige stabilisierende Wirkung des UV-Stabilisators 292 belegen. Vielmehr zeigen die Ergebnisse je nach Bewertungsparameter teils gegenläufige Tendenzen.

Regalrez®-1126 zeigt nach UV-C-Alterung in der makroskopischen Betrachtung eine leichte Vergilbung des ursprünglich vollständig transparenten Überzugs, was durch die Farbwertmessungen bestätigt wurde. Unter UV-Strahlung änderte sich das Erscheinungsbild von keiner wahrnehmbaren Lumineszenz im Ausgangszustand hin zu einer gelblichen Lumineszenz nach der Alterung. Die Glanzmessungen weisen tendenziell auf eine geringe Abnahme des Glanzgrades hin. Der Unterschied fällt mit etwa 1,18 GU jedoch sehr klein aus, sodass in Anbetracht der allgemein geringen Aussagekraft der Glanzwertmessungen die Aussagekraft dieses Parameters hier als eingeschränkt zu bewerten ist.

³²¹ Vgl. ebd.

Aus den Befunden ergibt sich insgesamt eine vorsichtige Tendenz zu einer positiven Wirkung des HALS UV-Stabilisator 292 bei der Stabilisierung UV-induzierter Degradationsprozessen der Regalrez® 1126-Filme. Bei der Betrachtung unter visuellem Licht ist der Effekt makroskopisch nur schwer sicher zu beurteilen, die Farbwertmessungen zeigen jedoch einen geringeren Farbunterschied gegenüber dem Ausgangszustand ($\Delta E = 0,60$) als bei den Referenzproben ohne Zusatz ($\Delta E = 0,78$). Dies spricht für eine geringere Bildung farbiger Degradationsprodukte, was für die stabilisierende Wirkung des Zusatzes spricht. Konsistent dazu wird bei den mit UV-Stabilisators 292 versetzten Proben unter UV-Strahlung eine reduzierte bis kaum vorhandene Lumineszenz beobachtet. Das deutet daraufhin, dass der UV-Stabilisator 292 Degradationsprozesse im Regalrez® 1126 beeinflusst, die zur Ausbildung lumineszierender Strukturen führen.

Diese Befunde entsprechen den in der Literatur beschriebenen Eigenschaften, wonach andere Regalrez®-Typen grundsätzlich als recht stabil gegenüber photochemischer Alterung gelten.³²² Sie stehen zudem im Einklang mit der als gut bewerteten Stabilisierbarkeit durch den HALS Tinuvin® 292 in Alterungsversuchen unter UVA-Bestrahlung.³²³

Der untersuchte **Nitrocelluloselack** zeigt unter UV-C-Alterung eine deutliche Vergilbung. Diese ist makroskopisch klar wahrnehmbar und wird durch die Farbwertmessungen bestätigt, die eine Verschiebung zu dunkleren und gelberen Farbkoordinaten zeigen. Im gealterten Zustand tritt unter UV-Anregung zudem eine helle gelbe Lumineszenz auf. Parallel dazu steigt der Glanzgrad im Mittel um 5,93 GU. Trotz der Streuung der Glanzwerte ist dieser Unterschied aufgrund seiner Größenordnung als belastbare Tendenz zu werten.

Bei Proben mit Zusatz des HALS UV-Stabilisators 292 ist makroskopisch eine geringere Vergilbung erkennbar als bei den Referenzproben. Korrespondierend zeigen die Farbwertmessungen einen kleineren Farbabstand ($\Delta E = 3,80$) im Vergleich zur Alterung ohne Zusatz ($\Delta E = 5,13$). Auch die Glanzänderung fällt mit dem Zusatz deutlich geringer aus. Statt einer mittleren Differenz von 5,93 GU reduziert sich die Differenz auf 1,54 GU. Zudem ist die Lumineszenzintensität der additivierten Proben bei der Bestrahlung mit UV-Strahlung geringer. Über alle betrachteten Kriterien hinweg ergeben sich damit konsistent kleinere optische Veränderungen im gealterten Zustand, was insgesamt für eine stabilisierende Wirkung des UV-Stabilisators 292 im verwendeten Nitrocelluloselack spricht.

³²² Vgl. DE LA RIE 1993.

³²³ Vgl. DE LA RIE/MCGLINCHY 1990a, S. 168f.

Grundsätzlich zeigen alle erprobten Überzüge-Additiv-Kombinationen unter UVC-Bestrahlung Veränderungen der untersuchten Eigenschaften. Über die eingesetzten Evaluationsmethoden hinweg weist Regalrez® 1126 dabei die geringsten Unterschiede zwischen Ausgangs- und Alterungszustand auf. Mit deutlichem Abstand folgen Schellack-Überzüge. Insgesamt am stärksten verändert werden die Nitrocelluloselackfilme. Die Befunde sprechen unter den gewählten Alterungsbedingungen für eine stabilisierende Wirkung des HALS UV-Stabilisators 292 bei Regalrez® 1126 und bei dem untersuchten Nitrocelluloselack. Bei den Regalrez® 1126-Proben mit diesem Zusatz kann nur ein sehr geringe Eigenschaftsveränderungen beobachtet werden, wohingegen bei den Nitrocelluloselackproben weiterhin deutliche Veränderungen mittels der Evaluationsmethoden erfassbar sind. Für schellackbasierte Überzüge lassen sich dagegen keine eindeutigen Aussagen zur Wirksamkeit ableiten, da die Ergebnisse inkonsistent ausfallen. Hier erscheinen Wiederholungsversuche und eine engere Kontrolle möglicher Einflussgrößen erforderlich. Darüber hinaus können Hinweise darauf festgestellt werden, dass Tinuvin® 900 gegenüber UV-C-Bestrahlung eine unzureichende Beständigkeit aufweist und dass sich durch den Zusatz die optischen Eigenschaften der jeweiligen Überzugsfilme mitverändern. Daraus lassen sich jedoch keine praxisrelevanten Schlussfolgerungen zur Wirksamkeit unter realen Expositionsbedingungen ableiten, da das Absorptionsspektrum des verwendeten UV-Absorbers primär im UVA-Bereich liegt³²⁴ und deshalb eine Wirksamkeit in der Praxis durchaus realistisch erscheint. Insgesamt ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit photochemischer Prozesse (siehe 3.1 UV-induzierte Degradationsprozesse) keine allgemeingültige Aussage zur UV-Beständigkeit der untersuchten Systeme möglich. Als Arbeitstendenz ergibt sich jedoch eine stabilisierende Wirkung des UV-Stabilisators 292 bei der energiereichen³²⁵ UVC-Alterung. Um die Ergebnisse für die Restaurierungspraxis nutzbar zu machen und belastbare Empfehlungen ableiten zu können, sind weiterführende Untersuchungen unter praxisnäheren Alterungsbedingungen und eine ergänzende analytische Charakterisierung der Abbauprozesse wünschenswert.

³²⁴ Siehe 8 Anhang: 8.4 Datenblätter: Tinuvin® 900

³²⁵ Vgl. KIEFER 1977, S. 3.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Frage, ob sich möbelspezifische transparente Überzugssysteme durch zugesetzte Additive gegenüber UV-induzierter Degradation stabilisieren lassen. Materialstabilisierende Additive sind ein präsenten Forschungsthema der Lack- und Farbenindustrie. Auch in der Konservierung und Restaurierung wurden sie diskutiert und untersucht, allerdings nicht aktuell und nicht im Kontext von Gemäldefirnismaterialien. Gleichzeitig ist die photochemische Alterung von Überzugsschichten auf Möbeln ein wiederkehrendes Schadensbild. Da transparente Überzüge sowohl eine Schutzfunktion übernehmen als auch maßgeblich zur ästhetischen Wirkung beitragen^{326 327} und zudem im Zuge konservatorischer und restauratorischer Maßnahmen aus unterschiedlichen Gründen neu aufgebracht werden, ist die Frage nach einer verbesserten UV-Beständigkeit dieser Systeme relevant. Ziel der Arbeit ist daher zu prüfen, ob stabilisierende Additive die Beständigkeit transparenter Möbelüberzüge gegenüber ultravioletter Strahlung erhöhen können.

Zur Annäherung an die Fragestellung wurde eine Versuchsreihe mit drei in Möbelkontexten vorkommenden beziehungsweise in Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen eingesetzten Überzugsmaterialien durchgeführt: Schellack, Regalrez® 1126 und dem Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“ (siehe 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis). Als stabilisierende Additive wurden zwei Substanzen mit unterschiedlichen Wirkmechanismen erprobt, sowohl einzeln als auch in Kombination: der UV-Absorber Tinuvin® 900 und ein sterisch gehindertes Amin (HALS) als Radikalfänger (UV-Stabilisator 292). Es wurden Probefilme auf Glasobjektträger aufgebracht und anschließend 120 Stunden mittels UVC-Strahlung künstlich photochemisch gealtert. Der Alterungsgrad wurde über Veränderungen optisch wahrnehmbarer Eigenschaften erfasst. Dies erfolgte einerseits qualitativ durch makroskopische und mikroskopische Untersuchungen unter sichtbarem Licht (VIS) und unter UV-Strahlung, andererseits quantitativ über Farb- und Glanzwertmessungen. Ergänzende Versuche zum Löslichkeitsverhalten lieferten im Rahmen dieser Arbeit keine belastbaren Aussagen und wurden daher nicht weiter in die Auswertung einbezogen.

Mikroskopisch konnten im ungealterten Zustand keine eindeutigen Unterschiede in Abhängigkeit von den eingesetzten Zusätzen festgestellt werden. Auch zwischen Vor- und Nachalterungszustand ergaben sich auf mikroskopischer Ebene keine differenzierbaren Befunde.

³²⁶ Vgl. DE LA RIE 1992, S. 63f.

³²⁷ Vgl. HORIE 2010, S. 37f.

Unter den Bedingungen der durchgeführten künstlichen Alterung zeigten alle untersuchten Überzug-Additiv-Kombinationen Eigenschaftsveränderungen auf. In der Gesamtbetrachtung wiesen Proben auf Regalrez®1126-Basis die geringsten Alterungserscheinungen auf, gefolgt von deutlich stärkeren Veränderungen bei Schellack. Am ausgeprägtesten veränderte sich der Nitrocelluloselack.

Hinsichtlich der Additivwirkung deuten die Befunde konsistent über die angewandten Evaluationsmethoden hinweg darauf hin, dass das Zusetzen des HALS UV-Stabilisator 292 für Regalrez® 1126 und den Nitrocelluloselack mit einer stabilisierenden Wirkung verbunden ist. Bei Regalrez® 1126-Proben mit Zusatz des HALS wurden insgesamt nur sehr geringe Eigenschaftsveränderungen beobachtet. Beim Nitrocelluloselack zeigte sich zwar ebenfalls eine Verbesserung gegenüber den Referenzproben, jedoch blieben die Veränderungen insgesamt weiterhin mittels der Evaluationsmethoden deutlich erfassbar. Für Schellack ergab sich im Hinblick auf den Zusatz von UV-Stabilisator 292 kein einheitliches Bild. Die Befunde waren hier im Vergleich zwischen den Evaluationsmethoden uneindeutig, sodass unter den gegebenen Bedingungen keine klare Aussage zur Wirksamkeit im Schellacksystem abgeleitet werden kann.

Für den UV-Absorber Tinuvin® 900 legen die Befunde nahe, dass dieser unter UVC-Bestrahlung keine Beständigkeit aufweist. Beobachtet wurden eine Gelbfärbung in gealtertem Zustand und Hinweise auf eine glanzmindernde Wirkung an der Filmoberfläche.

Methodisch zeigten die Farbwertmessungen in dieser Arbeit die höchste Aussagekraft, da sie quantitative, vergleichsweise streuungsarme Daten lieferten und damit eine robuste Beurteilung von Veränderungen ermöglichten. Makroskopische Beobachtungen (VIS und UV) und mikroskopische Untersuchungen waren aufgrund der subjektiven Komponente der Bewertung etwas weniger trennscharf. Die Glanzmessungen wurden aufgrund einer hohen Streuung der Messdaten (bei Schellackproben bis zu ± 10 GU) primär vergleichend herangezogen und erlaubten insgesamt nur die Ableitung von Tendenzen.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis ist nur sehr eingeschränkt möglich, da die künstliche Alterung mit UVC-Strahlung erfolgte, die in diesem Spektralbereich nicht Teil der natürlichen Strahlung an der Erdoberfläche ist. Da photochemische Degradationsprozesse wesentlich von der Wellenlänge des absorbierten Lichts abhängen, können sich Mechanismen und Reaktionsgeschwindigkeiten gegenüber UVA-induzierter Degradation unterscheiden.^{328 329} Diese Strahlungsverhältnisse sind jedoch für Innenräume mit, durch Glasfenster einstrahlendes

³²⁸ Vgl. DE LA RIE 1988b, S. 10.

³²⁹ Vgl. MILLS/SMITH 1990, S. 136.

Licht relevant.³³⁰ Dennoch lässt sich als Arbeitshypothese formulieren, dass eine unter sehr energiereicher UVC-Strahlung³³¹ beobachtete stabilisierende Wirkung, wie sie für den UV-Stabilisator 292 in zwei Systemen festgestellt wurde, prinzipiell auch im energieärmeren UVA-Bereich zu erwarten sein könnte. Diese Annahme ist jedoch in weiterführenden Versuchen mit praxisnäheren Alterungsbedingungen zu überprüfen. Ebenso sollte die Eignung des hier geprüften UV-Absorbers Tinuvin® 900 unter diesen Bedingungen erneut bewertet werden, wobei gegebenenfalls alternative UV-Absorberklassen mit höherer photochemischer Stabilität (z. B. HPT-basierte UV-Absorber) einzubeziehen wären.³³²

Insgesamt liefern die Ergebnisse dieser Arbeit erste Anhaltspunkte dafür, dass das Zusetzen von stabilisierenden Additiven zu transparenten Möbelüberzügen unter definierten Bedingungen zu einer verbesserten UV-Beständigkeit führen kann, wobei die Wirksamkeit deutlich systemabhängig ist. Zugleich zeigen die Befunde, dass Additive selbst zu unerwünschten optischen Veränderungen beitragen können und daher nicht nur hinsichtlich Schutzwirkung, sondern auch hinsichtlich ihrer Alterungsprodukte und ihrer Auswirkung auf das Erscheinungsbild bewertet werden müssen. Damit unterstreicht die Arbeit die anhaltende Relevanz des Themas und bietet eine Grundlage für weiterführende, praxisnähere Untersuchungen zur Stabilisierung transparenter Überzugssysteme in der Möbelkonservierung.

³³⁰ Vgl. FELLER 1994, S. 87, 91.

³³¹ Vgl. KIEFER 1977, S. 3.

³³² Vgl. SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008, S. 27.

7 Verzeichnisse

7.1 Bibliographie

ADR-ARBEITSGEMEINSCHAFT DER RESTAURATOREN 1999

Firnis: Material-Ästhetik-Geschichte. internationales Kollogium, Braunschweig, 15.-17.Juni 1998, hrsg. von AdR-Arbeitsgemeinschaft der Restauratoren (AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik) 1999.

ALLEN/EDGE/HORIE 1992

Polymers in conservation. The Proceedings of an international Conference organized by Manchester Polytechnic and Manchester Museum, Manchester, 17th-19th July 1991, hrsg. von N. S. Allen, M. Edge und C. V. Horie, Cambridge 1992.

BACCI 2019

Mauro Bacci, „Hints on the Luminescence Phenomena Theory Aspectos clave en la teoría de los fenómenos luminiscentes“, in: *UV-Induced Visible Luminescence for Conservation Documentation/Luminiscencia visible inducida por UV para la documentación en conservación*, hrsg. von Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox und Laura Fuster López (CONSERVATION 360, Bd. 1) 2019, S. 29–34.

BASF CORPORATION 2019a

BASF Corporation, *Tinuvin® 292 - Technical Data Sheet* (https://dispersions-resins-products.basf.us/files/technical-datasheets/Tinuvin_292_October_2019_R4_IC_PP.pdf).

BASF CORPORATION 2019b

BASF Corporation, *Tinuvin® 900-Technical Datasheet* (https://dispersions-resins-products.basf.us/files/technical-datasheets/Tinuvin_900_October_2019_R4_IC_PP.pdf, Zugriff zuletzt am 6.6.2026).

BERTHUMEYRIE/COLLIN/BUSSIÈRE/THERIAS 2014

Sebastien Berthumeyrie, Steeve Collin, Pierre-Olivier Bussiere und Sandrine Therias, „Photooxidation of cellulose nitrate: new insights into degradation mechanisms“, in: *Journal of Hazardous Materials* 272 (2014), S. 137–147.

BONNET 2009

Martin Bonnet, *Kunststoffe in der Ingenieuranwendung. verstehen und zuverlässig auswählen*, Wiesbaden 2009.

BONNET 2025

Martin Bonnet, *Kunststofftechnik. Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*, Wiesbaden 2025.

CIABACH 1999

Jerzy Ciabach, „Modern Picture Varnishes - Ageing and Possibility of Stabilization“, in: *Firnis: Material-Ästhetik-Geschichte. internationales Kollogium, Braunschweig, 15.-17.Juni 1998*, hrsg. von AdR-Arbeitsgemeinschaft der Restauratoren (AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik) 1999, S. 105–109.

COELHO/NANABALA/MÉNAGER/COMMEREUC/VERNEY 2012

Christian Coelho, Raviteja Nanabala, Matthieu Ménager, Sophie Commereuc und Vincent Verney, „Molecular changes during natural biopolymer ageing e The case of shellac“, in: *Polymer Degradation and Stability* 97 (2012), S. 936–940.

DE LA RIE 1988a

Renè E. de la Rie, „Photochemical and thermal degradation of films of dammar resin“, in: *Studies in Conservation* 33 (1988), S. 53–70.

DE LA RIE 1988b

Renè E. de la Rie, „Polymer stabilizers. A survey with reference to possible applications in the conservation field“, in: *Studies in Conservation* 33 (1988), S. 9–22.

DE LA RIE 1992

Renè E. de la Rie, „Stability and Function of coatings used in Conservation“, in: *Polymers in conservation. The Proceedings of an international Conference organized by Manchester Polytechnic and Manchester Museum, Manchester, 17th-19th July 1991*, hrsg. von N. S. Allen, M. Edge und C. V. Horie, Cambridge 1992, S. 62–81.

DE LA RIE 1993

Renè E. de la Rie, „Polymer Additives for Synthetic Low-Molecular-Weight Varnishes“, in: *COM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting Washington DC USA 20-27 August 1993*, hrsg. von ICOM Committee for Conservation 1993, S. 566–573.

DE LA RIE 1999

Renè E. de la Rie, „Polymer Additives for Synthetic Low-Molecular-Weight Varnishes“, in: *Firnis: Material-Ästhetik-Geschichte. internationales Kollogium, Braunschweig, 15.-17.Juni 1998*, hrsg. von AdR-Arbeitsgemeinschaft der Restauratoren (AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik) 1999, S. 142–151.

DE LA RIE/LOMAX/PALMER/MAINES 2002

Renè E. de la Rie, Suzanne Quillen Lomax, Michael Palmer und Christopher A. Maines, „An investigation of the photochemical stability of films of the urea-aldehyde resins Laropal® A 81 and Laropal® A 101“, in: *13th triennial meeting, Rio de Janeiro, 22 - 27 September 2002. Preprints*, hrsg. von ICOM Committee for Conservation, London 2002, S. 881–887.

DE LA RIE/MCGLINCHY 1989

Renè E. de la Rie und Christopher W. McGlinchey, „Stabilized Dammar Picture Varnish“, in: *Studies in Conservation* 34 (1989), S. 137.

DE LA RIE/MCGLINCHY 1990a

Renè E. de la Rie und Christopher W. McGlinchey, „New synthetic resins for picture varnishes“, in: *Cleaning, Retouching and Coatings. Reprints of the Contributions of the Brussels Congress, 3-7 September 1990*, hrsg. von John S. Mills und Perry Smith, London 1990, S. 168–173.

DE LA RIE/MCGLINCHY 1990b

Renè E. de la Rie und Christopher W. McGlinchey, „The effect of hindered amine light stabilizer on the aging of dammar and mastix varnish in an environment free of ultraviolet light“, in:

Cleaning, Retouching and Coatings. Reprints of the Contributions of the Brussels Congress, 3-7 September 1990, hrsg. von John S. Mills und Perry Smith, London 1990, S. 160–164.

EUROPEAN CONFEDERATION OF CONSERVATOR-RESTORERS' ORGANISATIONS A.I.S.B.L. 2003
European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations A.I.S.B.L., E.C.C.O.
Professional Guidelines (II). Code of Ethics, hg. von European Confederation of Conservator-Restorers' Organisations A.I.S.B.L. (<https://www.ecco-eu.org/home/ecco-documents/>).

FELLER 1994

Robert L. Feller, *Accelerated Aging. Photochemical and Thermal Aspects* (Research in conservation, Bd. 4) 1994.

GHOSH/GUPTA/KISHAN KUMAR 2015

Mili Ghosh, Sachin Gupta und V. S. Kishan Kumar, „Studies On The Loss Of Gloss Of Shellac And Polyurethane Finishes Exposed To Uv“, in: *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17 (2015), S. 39–44.

GIESSMANN 2010

Andreas Giessmann, *Substrat- und Textilbeschichtung*, Berlin, Heidelberg 2010.

HORIE 2010

C. V. Horie, *Materials for Conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings* 2010.

ICOM COMMITTEE FOR CONSERVATION 1993

COM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting Washington DC USA 20-27 August 1993, hrsg. von ICOM Committee for Conservation 1993.

ICOM COMMITTEE FOR CONSERVATION 2002

13th triennial meeting, Rio de Janeiro, 22 - 27 September 2002. Preprints, hrsg. von ICOM Committee for Conservation, London 2002.

KIEFER 1977

Jürgen Kiefer, *Ultraviolette Strahlen*, Berlin/New York 1977.

KIPPHAN 2000

Helmut Kipphan, *Handbuch der Printmedien. Technologien und Produktionsverfahren*, Berlin, Heidelberg 2000.

KREMER PIGMENTE GMBH

Kremer Pigmente GmbH, *Sicherheitsdatenblatt "78152 UV-Stabilisator 292 HALS"*
(https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/78152_SHD.pdf, Zugriff zuletzt am 6.6.2026).

KRUPA 2017

Andreas Krupa, „Sehen, Beschreiben, Verstehen. Möglichkeiten der visuellen Untersuchung transparenter Oberflächenüberzüge am Beispiel einer Gruppe von Möbeln aus dem Roentgen-Museum Neuwied“, in: *Transparente Oberflächen auf Holz. Beiträge zur Fachtagung 2015 in Würzburg*, hrsg. von Verband der Restauratoren (VDR) e.V. 2017, S. 160–170.

LAFONTAINE 1981

Raymond H. Lafontaine, „Use of stabilizers in varnish formulations“, in: *ICOM Committee for*

Conservation 7th Triennial Meeting, hrsg. von The International Council of Museums 1981, S. 5–17.

LIU/KAZARIAN 2022

Guan-Lin Liu und Sergei G. Kazarian, „Recent advances and applications to cultural heritage using ATR-FTIR spectroscopy and ATR-FTIR spectroscopic imaging“, in: *Analyst* 147 (2022), S. 1777–1797.

LÜBBE 2013

Eva Lübbe, *Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung*, Wiesbaden 2013.

MASKERY 1973

S. E. Maskery, „Development and applications for matting agents“, in: *Pigment & Resin Technology* 2 (1973), S. 11–19.

MATTERN 2004

Heidi Mattern, *Beständigkeit von mit Lichtschutzmitteln versetzten Schutzüberzügen auf Basis von natürlichen und synthetischen Harzen*, Diplomarbeit. Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen 2004.

MILLS/SMITH 1990

Cleaning, Retouching and Coatings. Reprints of the Contributions of the Brussels Congress, 3-7 September 1990, hrsg. von John S. Mills und Perry Smith, London 1990.

MILLS/WHITE 1987

John S. Mills und Raymond White, *The organic chemistry of museum objects* (Butterworths series in conservation and museology), London/Boston 1987.

NGUYEN 2023a

Trung Thanh Nguyen, „Degradation of acrylic-melamine based varnish containing Tinuvin 292 with accelerated exposure in fluorescent UV and condensation“, in: *Ministry of Science and Technology, Vietnam* 65 (2023), S. 21–26.

NGUYEN 2023b

Trung Thanh Nguyen, „Influence of Tinuvin 292 on Chlorinated Rubber Varnish/ Coating Properties under UV Radiation“, in: *Suan Sunandha Science and Technology Journal* 10 (2023), S. 132–140.

O'MALLEY 2010

Michael O'Malley, „Review of Samples from the 1994 CCI Workshop “Varnishes: Authenticity and Permanence” after 15 Years of Natural Ageing“, in: *Journal of the Canadian Association for Conservation (J. CAC)* 35 (2010), S. 3–8.

PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014

Anna Piccirillo, Stefania de Blasi, Paolo Luciani und Tommaso Poli, „Furniture finishing: new materials and methods for restoration“, in: *Furniture Finishes. Past, present and future of transparent wood coatings*, hrsg. von Miko Vasques Dias 2014, S. 73–83.

PICCOLLO/STOLS-WITLOX/FUSTER LÓPEZ 2019

UV-Induced Visible Luminescence for Conservation Documentation/Luminiscencia visible

inducida por UV para la documentación en conservación, hrsg. von Marcello Picollo, Maartje Stols-Witlox und Laura Fuster López (CONSERVATION 360, Bd. 1) 2019.

PIENA 2001

Hans Piena, „Regalrez in Furniture Conservation“, in: *Journal of the American Institute for Conservation* 40 (2001), S. 59–68.

PIETSCH 2005

Annik Pietsch, *Lösemittel. Ein Leitfaden für die restauratorische Praxis* (VdR-Schriftenreihe zur Restaurierung, Bd. 7), Stuttgart 2005.

RHOPOINT INSTRUMENTS GMBH 2023

Rhopoint Instruments GmbH, *Novo Gloss Trio Datenblatt*

(<https://www.rhopointinstruments.de/wp-content/uploads/2023/07/novo-gloss-glossmeter-datasheet-german-0912-02.pdf>, Zugriff zuletzt am 4.6.2026).

RHOPOINT INSTRUMENTS GMBH 2026

Rhopoint Instruments GmbH, *Rhopoint Oberflächenmessung FAQ*

(<https://www.rhopointinstruments.de/faqs/oberflaechenmessung/#h-testvorgang>, Zugriff zuletzt am 4.6.2026).

SCHAEFFER/LANGFELD 2014

Helmut A. Schaeffer und Roland Langfeld, *Werkstoff Glas*, Berlin, Heidelberg 2014.

SCHALLER/ROGEZ 2007

Christian Schaller und Daniel Rogez, „New approaches in wood coating stabilization“, in: *Journal of Coatings Technology and Research* 4 (2007), S. 401–409.

SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2008

C. Schaller, D. Rogez und A. Braig, „Hydroxyphenyl-s-triazines: advanced multipurpose UV-absorbers for coatings“, in: *Journal of Coatings Technology and Research* (2008), S. 25–31.

SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009

Christian Schaller, Daniel Rogez und Adalbert Braig, „Hindered amine light stabilizers in pigmented coatings“, in: *Journal of Coatings Technology and Research* 6 (2009), S. 81–88.

SELWITZ 1988

Charles Selwitz, *Cellulose nitrate in conservation* (Research in conservation, Bd. 2), Marina del Rey, Calif. 1988.

ŠIMŮNKOVÁ/PÁNEK/ZEIDLER 2018

Kristýna Šimůnková, Miloš Pánek und Aleš Zeidler, „Comparison of Selected Properties of Shellac Varnish for Restoration and Polyurethane Varnish for Reconstruction of Historical Artefacts“, in: *Coatings* 8 (2018), S. 119.

STROMER/SILVESTRINI/FISCHER 2005

Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft, hrsg. von Klaus Stromer, Narciso Silvestrini und Ernst Peter Fischer, Köln 2005.

THE INTERNATIONAL COUNCIL OF MUSEUMS 1981

ICOM Committee for Conservation 7th Triennial Meeting, hrsg. von The International Council of Museums 1981.

VALET/BRAIG 2017

Andreas Valet und Adalbert Braig, *Light stabilizers for coatings* (European coatings library), Hannover 2017.

VASQUES DIAS 2014

Furniture Finishes. Past, present and future of transparent wood coatings, hrsg. von Miko Vasques Dias.

VERBAND DER RESTAURATOREN (VDR) E.V. 2017

Transparente Oberflächen auf Holz. Beiträge zur Fachtagung 2015 in Würzburg, hrsg. von Verband der Restauratoren (VDR) e.V. 2017.

WALCH/KOLLER 1997

Lacke des Barock und Rokoko. = Baroque and Rococo lacquers, hrsg. von Katharina Walch und Johann Koller (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Bd. 81), München 1997.

WEILHAMMER 2001

Ulrich Weilhammer, *Der Einfluss von Kunstharzüberzügen auf das Alterungsverhalten von Naturharzfirnissen*. Berner Fachhochschule für Gestaltung, Kunst und Konservierung 2001.

WOLLRAB 2014

Adalbert Wollrab, *Organische Chemie. Eine Einführung für Lehramts- und Nebenfachstudenten*, Berlin, Heidelberg 2014.

ZUMBÜHL 2011

Stefan Zumbühl, *Löslichkeit von Firnismaterialien*, Kapiel aus Dissertation: Lösemittlempfindlichkeit von modernen Farbsystemen – Parametrisierung der Lösemittelsensitivität von Öl-, Alkyd- und Acryl-Künstlerfarben. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart 2011.

7.2 Abbildungsverzeichnis und -nachweis

Abbildung 1 Schematischer Mechanismus der photochemischen Oxidation organischer Materialien, nach VALET/BRAIG 2017, MILLS/SMITH 1990, DE LA RIE 1988b	12
Abbildung 2 Transmissionsspektrum von verschiedenen UV-Absorber-Klassen, c=10mg/L in Chloroform	18
Abbildung 3 Reaktionsmechanismus von sterisch gehinderten Aminen (HALS) nach dem Denisov-Zyklus	20
Abbildung 4 Strukturformel des UV-A Tinuvin® 900	28
Abbildung 5 Strukturformeln der HALS im Tinuvin® 292	29
Abbildung 6 Übersicht der erprobten Überzugs-Additivkombinationen	31
Abbildung 7 ein Objektträger in der Vorrichtung zum Auftragen der Überzugsfilme, VIS	33
Abbildung 8 Auftropfen des Überzuges auf den Objektträger vor den Rakel, VIS	33
Abbildung 9 Probekörper: Überzugsfilm auf Glasobjektträger, VIS	33
Abbildung 10 Spektrum der emittierten Strahlung der UV-C-Quelle „UV STICK E40 H-NX“	35
Abbildung 12 Schablone mit Führungshilfe des Farbmess-gerätes, VIS	39
Abbildung 13 Abbildung 14 L*, a* und b*- Werte im CIELAB-Farbraum	39
Abbildung 11 L*, a* und b*- Werte im CIELAB-Farbraum	39
Abbildung 15 Schablone mit Markierungen für die Glanzwertmessungen, VIS	41
Abbildung 16 Schellack-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV-Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292) jeweils im Vorzustand (links) und nach der künstlichen Alterung (rechts), VIS	46
Abbildung 17 Regalrez® 1126-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin®900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.:1. - Vorzustand 2.-5.-nach der künstlichen Alterung, VIS	47
Abbildung 18 Nitrocelluloselack-Probekörper mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV-Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV-Stabilisator 292) jeweils im Vorzustand (links) und nach der künstlichen Alterung (rechts), VIS	47
Abbildung 19 UV-Lumineszenzfarben von Schellack-Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O-ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV	48
Abbildung 20 UV-Lumineszenz von Regalrez®1126 Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O- ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV	49
Abbildung 21 UV-Lumineszenz von Nitrocellulose- Probekörpern mit den jeweiligen Zusätzen (O- ohne Zusätze, 900- Tinuvin® 900, 292- UV Stabilisator 292, KB-Kombination Tinuvin® 900/ UV Stabilisator 292), v.l.n.r.: 1-ungealtert, 2-5 künstlich gealtert, UV	50
Abbildung 22 Mikroskopaufnahmen der Struktur der Probefilme, v.l.n.r. Schellack, Regalrez® 1126, Nitrocellulose; Durchlicht, VIS	52
Abbildung 23 Diagramm: Mittelwerte und Standardabweichung der Farbwerte der Schellackprobefilme im Vorzustand, n=9	53
Abbildung 29 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Schellackprobefilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9	55
Abbildung 24 Mittelwerte und Standardabweichung der Farbwerte der Schellackprobefilme im Vor- und Nachzustand, n=9	55

Abbildung 26 Mittelwert und Standardabweichung der Farbwerte des Untergrundes des Versuchsaufbau bei der Farbwertmessung und der Regalrez® 1126-Proben ohne Zusatz	56
Abbildung 27 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Regalrez 1126-Probefilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9	56
Abbildung 28 Mittelwert und Standardabweichung der Farbwerte des Untergrundes des Versuchsaufbau bei der Farbwertmessung und der Nitrocellulose-Proben ohne Zusatz	57
Abbildung 29 Farbabstand und Differenzen der Farbwerte der Nitrocelluloselack-Probefilme vom Vor- zum Nachzustand, n=9	58
Abbildung 30 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Schellackproben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Werte der einzelnen Additiv-Gruppen, n=9	61
Abbildung 31 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Regalrez 1126-Proben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Werte der einzelnen Additiv-Gruppen, n=9	62
Abbildung 32 Mittelwerte und Standardabweichungen der Glanzgradmessungen an den Nitrocelluloselack-Proben im Vorzustand und nach der künstlichen Alterung, Differenz der Mittelwerte der einzelnen Additiv-Gruppen, n=9	62

Abb. Nr.	Nachweis
2	VALET/BRAIG 2017 Andreas Valet und Adalbert Braig, Light stabilizers for coatings (European coatings library), Hannover 2017, S. 26
3	SCHALLER/ROGEZ/BRAIG 2009 Christian Schaller, Daniel Rogez und Adalbert Braig, „Hindered amine light stabilizers in pigmented coatings“, in: Journal of Coatings Technology and Research 6 (2009), S. 82
4	BASF CORPERATION 2019b BASF Corporation, Tinuvin® 900-Technical Datasheet (https://dispersions-resins-products.basf.us/files/technical-datasheets/Tinuvin_900_October_2019_R4_IC_PP.pdf , Zugriff zuletzt am 6.6.2026).
5	BASF CORPERATION 2019a BASF Corporation, Tinuvin® 292 - Technical Data Sheet (https://dispersions-resins-products.basf.us/files/technical-datasheets/Tinuvin_292_October_2019_R4_IC_PP.pdf).

Sofern nicht anders gekennzeichnet stammen alle Abbildungen von der Autorin.

7.3 Verwendete Hilfsmittel

ChatGPT (Open AI, GPT 5.2): <https://hawki.hawk.de/chat>

- Erstellung von VBA-Code für Excel (Formatierung von Datentabellen und Diagrammen)
- Formulierungshilfe von Sätzen (nicht inhaltlich)
- Unterstützung bei der Strukturierung einzelner Kapitel (nicht inhaltlich)

DeepL Translator (DeepL SE): <https://www.deepl.com/de/translator>

- Übersetzen von Textpassagen (Abstract)

7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

Materialien

Material	Hersteller / Händler	Artikel-nummer	Link
Aceton	-/ Carl Roth GmbH + Co. KG	-	https://www.carlroth.com/de/de/rotisolv-pestilyse-plus-loesungsmittel/acetone/p/7535.1
Blätterschellack Lemon Nr.17	-/Deffner Johann GmbH	2370010	https://deffner-johann.de/de/blaetterschellack-nr-17-lemon-100-g.html
Ethanol: Ethylalkohol, min. 99,8%	-/ Kremer Pigmente GmbH & Co. KG	70805	
Glasobjektträger, aus Kalk-Natronglas, Kanten geschliffen 90°	Carl Roth GmbH + Co. KG	H869	https://www.carlroth.com/de/de/objekttraeger-standard/objekttraeger-kanten-geschliffen-90%C2%B0/p/h869.1
Nitrocelluloselack „Clou – L1 Holzlack seidenmatt“	Alfred Clouth Lackfabrik GmbH & Co. KG/ -	-	
Knochenraker: Film Applicator Size: 100-200-300-400	Vertrieb: Fruug Limited Fountain/ Verkäufer: Dongguan Rui Diao Electronic	-	-
Regalrez® 1126	-/ Kremer Pigmente GmbH & Co. KG	67284 (ehem. 67266)	https://www.kremer-pigmente.com/de/shop/mal-binde-klebemittel/loesemittelloesliche-bindemittel/67284-Regalrez®1126.html
Tinuvin® 900	BASF/ Kremer Pigmente	78150	Vertrieb eingestellt

	GmbH & Co. KG		
UV-Stabilisator 292 HALS	-/ Kremer Pigmente GmbH & Co. KG	78152	https://www.kremer-pigmente.com/de/shop/loesemittel-chemikalien-hilfsmittel/78152-uv-stabilisator-292-hals.html
Siedegrenzbenzin 100-140 °C	-/ Carl Roth GmbH + Co. KG	-	https://www.carlroth.com/de/de/von-a-bis-z/benzin-100-140/p/9675.1
Xylol (Dimethylbenzol), Isomerengemisch	-/ Kremer Pigmente GmbH & Co	70503	https://www.kremer-pigmente.com/de/shop/loesemittel-chemikalien-hilfsmittel/70503-xylol.html

Geräte und Hilfsmittel

Name	Hersteller	Artikelnummer	Link
Adapter für Mikroskop: Microscope camera ODC 825	KERN & SOHN GmbH	-	https://www.kern-sohn.com/shop/en/products/optical-instruments/microscope-cameras/odc-825/
Datenlogger: Testo 175-H2	Testo SE & Co. KGaA	-	-
Mikroskop: Axiolab A	Carl Zeiss Ag	Ser. Nr.32416	-
Spectrum Two FT-IR Spectrometer	PerkinElmer	L160000A	https://shop.perkinelmer.com/en-DE/product/spectrum-two-ftirsp10-software/01tPs00000Af76ulAB
UVC-Lampe: UV STICK E40 H-NX	uv-technik meyer GmbH	-	-
Fotografie			
Kamera: EOS 90D Kamera	Canon	-	https://www.canon.de/store/canon-eos-90d-kamera-ef-s-18-135mm-f-3-5-5-6-is-usm-objektiv/3616C017/
Objektiv: EF 35mm f/1.4L II USM Objektiv	Canon	9523B005	https://www.canon.de/store/canon-ef-35mm-f-1-4l-ii-usm-objektiv/9523B005/
VIS-Lampen: Nanlite FC 500B Bi-Color LED Spotlight	Nanlite US	FC500B	https://nanliteus.com/products/fc-500b-bi-color-led-spotlight-2-light-kit-with-softboxes-and-rolling-case?_pos=5&_sid=b7d554fac&_ss=r
UV-Lampen: UV-Flächenleuchte LED	Deffner Johann GmbH	5555295	https://deffner-johann.de/de/uv-led-flaechenleuchte-mit-stativadapter.html
Colorchecker: ColorChecker Classic	X-Rite, neuer Hersteller: Calibrite	msccc	https://www.xrite.com/de/categories/calibration-profiling/colorchecker-classic
UV-Target: Target-UV™	UV Innovations		https://www.uvinnovations.com/target-uv

8 Anhang

Anhangsverzeichnis

8.1 Protokolle zur Herstellung der Probekörper	84
8.1.1 Vorversuche zur Herstellung der Probekörper	84
8.1.2 Herstellung der Überzug-Additiv-Kombinationen	89
8.2 Fotodokumentation zu den optischen Betrachtungen	92
8.3 Umgebungsbedingungen während der UVC-Alterung	98
8.4 Datenblätter	99
8.5 Verzeichnisse	106
8.5.1 Bibliographie	106
8.5.2 Abbildungsverzeichnis und -nachweis	106

8.1 Protokolle zur Herstellung der Probekörper

8.1.1 Vorversuche zur Herstellung der Probekörper

<i>8.1.1.1 Ermitteln des Feststoffgehaltes in dem Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“¹</i>			
Begründung	Die Angaben für die Menge an zugefügten lichtstabilisierenden Zusätzen bezieht sich auf die jeweiligen Feststoffanteil in den flüssigen Überzugssystemen. Der zu erprobende Nitrocelluloselack wird in bereits gelöstem Zustand bezogen, jedoch sind keine Angaben zum Feststoffgehalt den Datenblättern zu entnehmen. Aufgrund dessen muss dieser experimentell bestimmt werden.		
Vorgehensweise	In dem flüssigen Lack sind flüchtige Substanzen (ein Gemisch aus n-Butylacetat, Isopropanol, 1-Methoxy-2-propanol, Xylol, Dipropylenglykol-methylether und Ethylbenzol), welche im Trocknungsprozess verdunsten. Übrig bleibt der nichtflüchtige Anteil welcher einen festen Film bildet. Um den prozentualen Feststoffanteil (Masseanteil) zu ermitteln wird eine kleine Menge des flüssigen Nitrocelluloselackes ausgegossen und deren Masse bestimmt. Nach dem Ausdunsten der flüchtigen Bestandteile (5 Tage) wird erneut die Masse bestimmt. Anhand der Differenz kann der Masseanteil rechnerisch bestimmt werden		
Messwerte	flüssiger Lack	1,8317 g	m_{gesamt}
	fester Lackfilm (nach 5 Tagen)	0,40229 g	m_i
Berechnung	$\omega = \frac{m_i}{m_{gesamt}} \times 100\%$ $\omega = \frac{0,40229 \text{ g}}{1,8317 \text{ g}} \times 100\%$ $\omega = 22,2 \%$		
Ergebnis	Der experimentell bestimmte Feststoffgehalt in dem flüssigen Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“ beträgt 22,2 %. Dieses Ergebnis ist nicht als genauer Wert zu betrachten, da nur mit geringen Stoffmengen und in einmaliger Durchführung gearbeitet wurde. Jedoch ist die Genauigkeit für diese Versuchsreihe ausreichend.		

¹ Siehe Hauptteil: 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

8.1.1.2 Etablieren einer geeigneten Vorgehensweise zum Auftragen der Überzugsfilme

Begründung und Zielstellung	In vergleichbaren Versuchen werden Probefilme von Überzugsmaterialien zwar ebenfalls auf Glas aufgebracht. Dies geschieht jedoch entweder mittels Pinsel- oder Sprühauftrag.² (Zum Teil sind auch keine Informationen zu der Herstellung der Probekörper vermerkt). Dies erschwert die Vergleichbarkeit der hergestellten Filme, da die Entstehung unterschiedlicher Schichtdicken und Oberflächenbeschaffenheiten wahrscheinlich sind. Für diese Arbeit sollen jedoch Probefilme mit möglichst gleichmäßiger und reproduzierbarer Schichtdicke erzeugt werden.³ Als geeignetes Verfahren wird hierfür der Auftrag mit einem Filmziehrakel erachtet. Da in der Literatur im für die vorliegende Arbeit relevanten Kontext keine Angaben zu dieser Auftragstechnik zu finden sind, werden die Applikationsparameter wie die aufzubringende Materialmenge, die Viskosität der Überzugslösung und die Handhabung erprobt und für das weitere Vorgehen definiert. Dabei wird berücksichtigt, dass Überzüge auf Holzoberflächen in der Praxis häufig in vergleichsweise größeren Schichtstärken vorliegen und dass dickere Filme Alterungserscheinungen tendenziell deutlicher ausprägen können, was die Beobachtbarkeit und Messbarkeit im weiteren Versuchsverlauf verbessert. Der Vorversuch dient somit der Definition einer standardisierten Vorgehensweise und eines reproduzierbaren Ablaufs zur Probenpräparation.
Vorgehensweise	Es stehen ein Kastenrakel und ein 10 cm langer Knochenrakeln (Filmdicken von 100, 200, 300, und 400 µm) zur Verfügung. - Zunächst werden diese Rakelarten hinsichtlich der Handhabbarkeit und der Grundsätzlichen Eignung im vorliegenden Kontext verglichen. Dabei werden diese in der Anwendung mit den drei Überzugssystemen erprobt. -Zudem werden für die einzelnen Überzugssysteme geeignete Konzentrationen definiert. Um beim verdunsten des Lösemittels möglichst geringe Volumenabnahmen bei den Probefilmen zu erzielen, ist eine möglichst hohe Konzentration gewünscht. Die selber in Lösung zu überführende Überzugssysteme (Schellack und Regalrez® 1126) werden zunächst recht hochprozentig (40 %-ig) angesetzt. Im Versuch wird von dieser hohen Konzentration solange verdünnt bis ein zufriedenstellendes Ergebnis bei den herzustellenden Filmen erzielt werden kann.

² Vgl. PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014.

³ Siehe Hauptteil: 4.2 Herstellung der Probekörper

	- Außerdem wird gegebenenfalls die Schichtdicke der erzeugten Filme (bei dem Knochenraker) hinsichtlich dem Erzeugen geeigneter Ergebnisse variiert. Es erfolgt eine makroskopische Bewertung der erzeugten Überzugsfilme hinsichtlich ihrer Gleichmäßigkeit in Schichtdicke und Breite. Zusätzlich wird der Auftragsprozess in Bezug auf Reproduzierbarkeit und Handhabbarkeit beurteilt.
Materialien	Knochenraker Kastenraker Glasobjektträger Überzugssysteme

Versuch zur Eignung der Raker

Die mit dem Kastenraker erzeugten Filmbahnen sind schmaler als die Glasobjektträger. Nach dem Filmziehen zeigen die Filme zudem ein seitliches „verlaufen“ bzw. eine Randaufweitung. Am Ende der Zugbewegung saugt sich der Raker zudem auf dem Untergrund fest, sodass der entsprechende Filmabschnitt beim Abnehmen zerstört wird. Darüber hinaus lässt sich ein gleichmäßiger Film erst ab einer Strecke ziehen, die mindestens der Rakellänge entspricht. Dadurch entsteht insgesamt nur ein relativ kleiner Bereich mit gleichmäßiger Schicht. Insgesamt ist die Handhabung als schwierig zu bewerten, wodurch unter der vorliegenden Aufgabenstellung die Erzeugung reproduzierbarer Probefilme erschwert wird. Das Auftragen der Überzüge mit dem Kastenraker auf Glasobjektträger wird daher aufgrund der Anforderungen an die Probefilme als ungeeignet bewertet.

Mit dem Knochenraker lassen sich über die ganze Länge der Objektträger gleichmäßige Filme herstellen. Die Handhabung ist zudem als recht einfach und zum Herstellen von vergleichbaren Filmen als geeignet zu bewerten

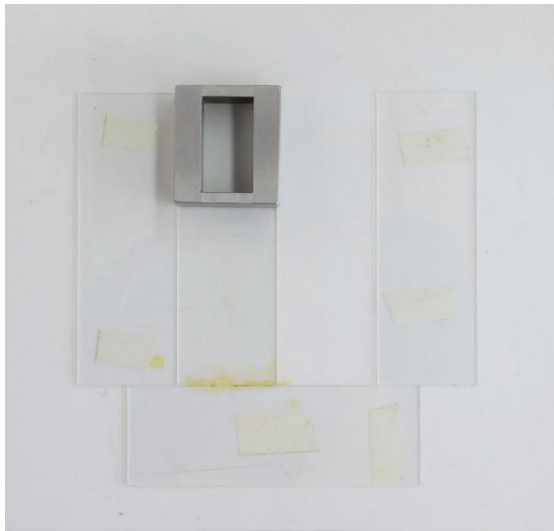


Abbildung A1 Auftrag der Überzüge mit Kastenraker, VIS

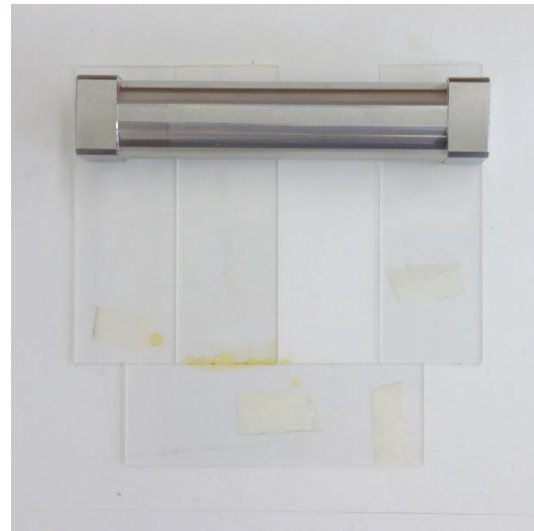


Abbildung A2 Auftrag der Überzüge mit Knochenraker, VIS

Definieren geeigneter Konzentrationen und aufzubringende Materialmenge

Vorgehen	Mit einer Pipette wird eine bestimmte Menge des Überzuges vor den Knochenraker auf den Objektträger getropft. Mit einer zügigen, gleichmäßigen Bewegung erfolgt die Verteilung des Überzuges auf dem Objektträger.
----------	---

SCHELLACK			
Schichtdicke in μm	Konzentration in %	Materialmenge	Beobachtung/ Bemerkung
400	40	5 Tropfen	- bevor mit dem Rakel der Film gezogen wird, trocknen die Tropfenränder leicht an, noch im getrockneten Zustand erkennbar - am Objektträgerende bleibt Überzug über →zu viel Material
400	30	5 Tropfen	- kein Antrocknen der Tropfen - am Objektträgerende bleibt Überzug über →zu viel Material → weniger Überzug auftragen
400	20	5 Tropfen	- kein Antrocknen der Tropfen - deutlich hellere Farbe
400	30	4 Tropfen	- kein Antrocknen der Tropfen - am Objektträgerende kein Überzugsmaterial mehr über - bei Wiederholung Schwierigkeiten gleichmäßige Filme zu reproduzieren → geringere Schichtdicke erproben
200	30	4 Tropfen	- kein Antrocknen der Tropfen - am Objektträgerende ist Überzugsmaterial übrig →weniger Material - bei Wiederholung lassen sich vergleichbare Filme produzieren
200	30	3 Tropfen	- kein Antrocknen der Tropfen - am Objektträgerende kein Überzugsmaterial mehr über - bei Wiederholung lassen sich vergleichbare Filme produzieren
Ergebnis		Das für den Auftrag der Schellackfilme geeignetste Vorgehen zur Herstellung der Filme wird mit einer Feststoffkonzentration von 30 % erzielt. Dafür werden Filme mit der Rakelspalthöhe von 200 μm und drei Tropfen des flüssigen Überzuges appliziert.	
REGALREZ® 1126			
Schichtdicke in μm	Konzentration in %	Materialmenge	Beobachtung/ Bemerkung
400	40	5 Tropfen	- beim Verteilen mit dem Rakel schwierig eine gleichmäßige Oberfläche zu erzeugen → geringere Konzentration - am Objektträgerende bleibt Überzug über →zu viel Material
400	30	4 Tropfen	- am Objektträgerende kein Überzugsmaterial über - bei Wiederholung Schwierigkeiten gleichmäßige Filme zu reproduzieren → geringere Schichtdicke erproben
200	30	4 Tropfen	- bei Wiederholung lassen sich vergleichbare Filme produzieren - am Objektträgerende bleibt Überzug über →zu viel Material
200	30	3 Tropfen	- bei Wiederholung lassen sich vergleichbare Filme produzieren - am Objektträgerende kein Überzugsmaterial über
Ergebnis		Das für den Auftrag der Regalrez® 1126-Filme geeignetste Vorgehen zur Herstellung der Filme wird mit einer Feststoffkonzentration von 30 % erzielt. Dafür werden Filme mit der Rakelspalthöhe von 200 μm und drei Tropfen des flüssigen Überzuges appliziert.	

NITROCELLULOSELACK „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“
Bei den beiden weiteren Überzugssystemen (Schellack und Regalrez® 1126) wurde das Filmziehen mit einer Filmdicke von 200 µm und einer Materialmenge von drei Tropfen als geeignete Vorgehensweise etabliert. Aus Gründen der Vereinfachung und Standardisierung wurde diese Einstellung, nach positiven Ergebnissen in der Erprobung, auch für den Nitrocelluloselack übernommen. Dieser liegt als gebrauchsfertiges Produkt mit vergleichsweise geringen Konzentration (ca. 22 % (siehe 8.1.1.1 Ermitteln des Feststoffgehaltes in dem Nitrocelluloselack „Clou- L1 Holzlack seidenmatt“)) vor.

8.1.2 Herstellung der Überzug-Additiv-Kombinationen

allgemeines Vorgehen

Es werden jeweils 20 ml pro Überzug-Additiv-Kombination hergestellt. Dies ermöglicht, dass die Menge an Additiv in einer gut abzuwiegenden Größenordnung (die zweite Nachkommastelle) liegt und erlaubt genaues Arbeiten.

In den Vorversuchen zu dem Auftrag der Lacke auf die Glasobjektträger zeigten bei dem Schellack und dem Regalrez® 1126 die 30 %-ige Konzentration die beste Verarbeitung und dabei das gleichmäßigste Ergebnis. Der Nitrocelluloselack ließ sich in der bereits vorgefertigten Konzentration adäquat aufbringen.

Das Tinuvin® 900 ist nur in geringsten Mengen in den gewählten Lösemitteln des Schellacks und Regalrez® 1126 löslich. Jedoch besteht eine gute Löslichkeit in Xylol. Dieses ist mit den Lösemitteln Ethanol und Siedegrenzbenzin löslich bzw. mischbar.⁴ Durch ein Auflösen des Additivs in Xylol kann ein Einbringen des Additives in die Lacke erzielt werden. Der UV-Stabilisator 292 lässt sich sowohl in Ethanol, als auch in Siedegrenzbenzin lösen. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der einzelnen Probefilme wird jedoch allen Probenvarianten dieselbe Menge an Xylol wie für das Tinuvin® 900 beigelegt. Um die Zielkonzentration von 30 % zu erreichen werden die Grundlösungen des Schellacks und des Regalrez® 1126 mit erhöhter Konzentration (40 %-ig) angesetzt.

In dem Nitrocelluloselack sind bereits geringe Mengen an Xylol als Lösemittel enthalten. Um das adäquate Auflösen des Tinuvin® 900 zu gewährleisten wird dieses Additiv gleich wie bei den anderen Überzugsvarianten in Xylol aufgelöst. Auch hier wird allen anderen Probenvarianten dieselbe Menge an Xylol beigelegt.

Die Konzentrationen der Zusätze beziehen sich auf den Feststoffgehalt in den flüssigen Lacken. Deshalb wird zunächst der Feststoffgehalt in den angesetzten 20 ml der Überzugsvarianten ermittelt und davon die notwendige Menge an Zusätzen abgeleitet.

Berechnungs- grundlage	$\omega = \frac{m_i}{m_{gesamt}} * 100$ ω = Masseanteil m_i = Masse des Feststoffes in der Lösung m_{gesamt} = Gesamtmasse der Lösung	$V_2 = 20 \text{ ml}$ $c_2 = 30 \%$ $c_1 = 40 \%$ $V_1 * c_1 = V_2 * c_2$ $V_1 = \frac{V_2 * c_2}{c_1}$ $V_1 = 15 \text{ ml}$ $\Delta(V_1 - V_2) = 5 \text{ ml}$ $\rho_{Xylol}^{5} = 0,88 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ $5 \text{ ml entsprechen } 4,4 \text{ g}$
-----------------------------------	--	--

⁴ Vgl. PIETSCH 2005, S. 99.

⁵ Vgl. KREMER PIGMENTE GMBH 2024.

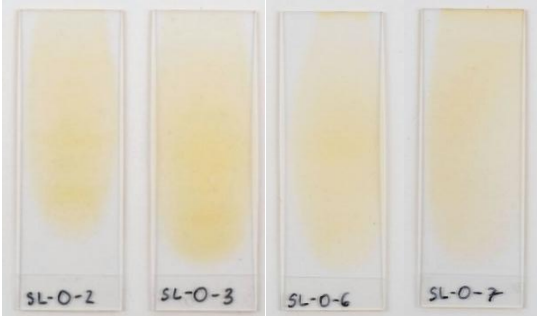
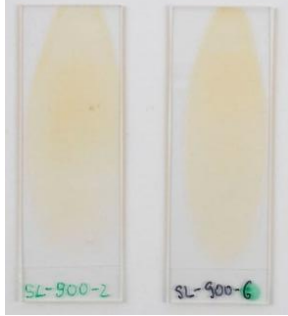
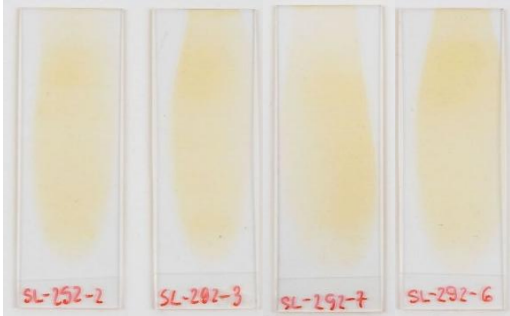
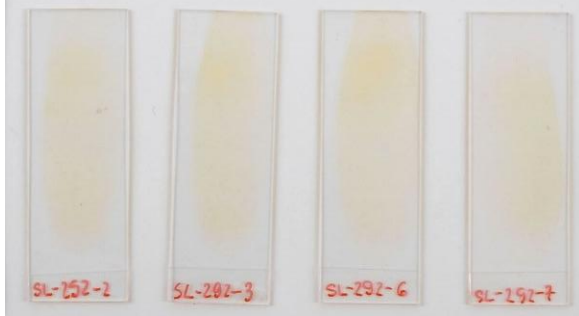
Überzug-Additivkombinationen auf Grundlage von Schellack		
Lösen des Schellacks in Ethanol	Zunächst wird der als Blatterschellack bezogene Rohstoff in Ethanol ⁶ (40 % w/w) über 48h mit mehrmaligem Rühren in Lösung gebracht. Vorhandene Verunreinigen werden anschließend mittels eines Feinstrumpfes aus der Lösung gefiltert.	
Berechnungen	$m_{gesamt}(15 \text{ ml } (40 \%)) = 13,32 \text{ g}$ $m_i = m_{gesamt} * 0,4 = 5,328 \text{ g}$ $m_{Tinuv\text{in } 292} = m_i * 0,02 \approx 0,11 \text{ g}$ $m_{Tinuv\text{in } 900} = m_i * 0,03 \approx 0,160 \text{ g}$	
SL- O	Schellack (30-%ig) - ohne Zusatz	15 ml (SL-40 %) + 5 ml Xylol
SL- 292	Schellack (30-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292	15 ml (SL-40 %) + (5 ml Xylol + 0,11 g UV-Stabilisator 292)
SL-900	Schellack (30-%ig) + 3 % Tinuvin® 900	15 ml (SL-40 %) + (5 ml Xylol + 0,16 g Tinuvin® 900)
SL- KB	Schellack (30-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292 + 3 % Tinuvin® 900	15 ml (SL-40 %) + (5 ml Xylol + 0,11 g UV-Stabilisator 292 + 0,16 g Tinuvin® 900)
Überzug-Additivkombinationen auf Grundlage von Regalrez® 1126		
Lösen des Regalrez® 1126	Das in Graupenform bezogene Regalrez® 1126 wird in Siedegrenzbenzin ⁷ (40 % w/w) unter Rühren in Lösung gebracht.	
Berechnungen	$m_{gesamt}(15 \text{ ml } (40 \%)) = 12,27 \text{ g}$ $m_i = m_{gesamt} * 0,4 = 4,908 \text{ g}$ $m_{Tinuv\text{in } 292} = m_i * 0,02 \approx 0,10 \text{ g}$ $m_{Tinuv\text{in } 900} = m_i * 0,03 \approx 0,15 \text{ g}$	

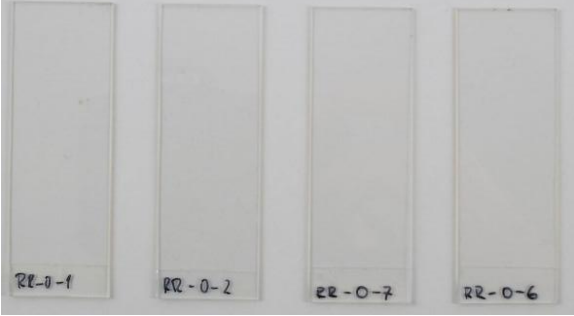
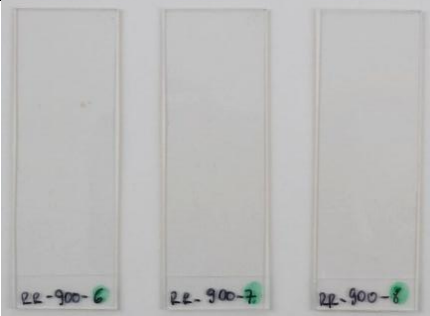
⁶ Siehe Hauptteil: 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis⁷ Siehe Hauptteil: 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

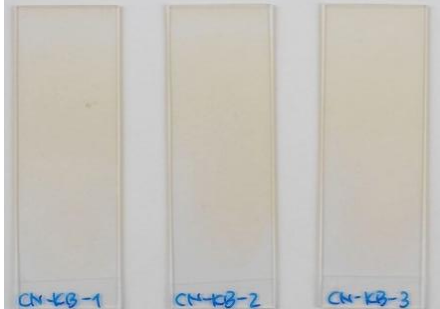
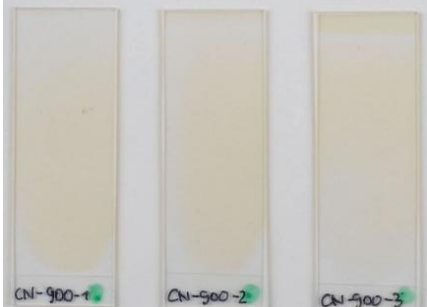
RR-O	Regalrez® 1126 (30-%ig) -ohne Zusatz	15 ml (RR-40 %) + 5 ml Xylol
RR-292	Regalrez® 1126 (30-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292	15ml (RR-40 %) + (5 ml Siedegrenzbenzin + 0.10 g UV-Stabilisator 292)
RR-900	Regalrez® 1126 (30-%ig) + 3 % Tinuvin® 900	15ml (RR-40 %) + (5 ml Xylol + 0,15 g Tinuvin® 900)
RR-KB	Regalrez® 1126 (30-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292 + 3 % Tinuvin® 900	15ml (RR-40 %) + (5 ml Xylol + 0,10 g UV-Stabilisator 292 + 0,15 g Tinuvin® 900)
Überzug-Additivkombinationen auf Grundlage des Nitrocelluloselack⁸		
Berechnungen		$m_{gesamt}(15 \text{ ml } (22 \%)) = 14,26 \text{ g}$ $m_i = m_{gesamt} * 0,22 = 3,137 \text{ g}$ $m_{Tinuvin 292} = m_i * 0,02 \approx 0,06 \text{ g}$ $m_{Tinuvin 900} = m_i * 0,03 \approx 0,09 \text{ g}$
CN-O	CN- Lack (17-%ig)-ohne Zusatz	15 ml + 5ml Xylol
CN-292	CN- Lack (17-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292	15 ml + (5ml Xylol + 0,06 g UV-Stabilisator 292)
CN-900	CN- Lack (17-%ig) + 3 % Tinuvin® 900	15 ml + (5ml Xylol + 0,09 g Tinuvin® 900)
CN-KB	CN- Lack (17-%ig) + 2 % UV-Stabilisator 292 + 3 % Tinuvin® 900	15 ml + (5ml Xylol + 0,06 g UV-Stabilisator 292 + 0,09 g Tinuvin® 900)

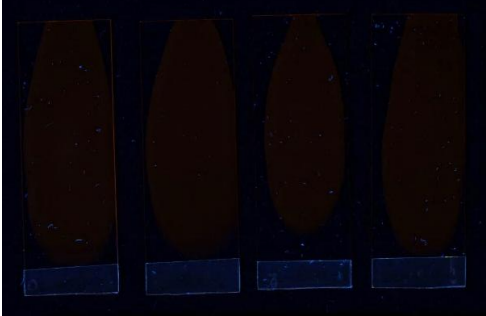
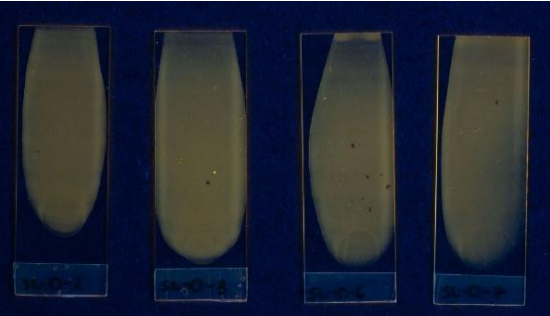
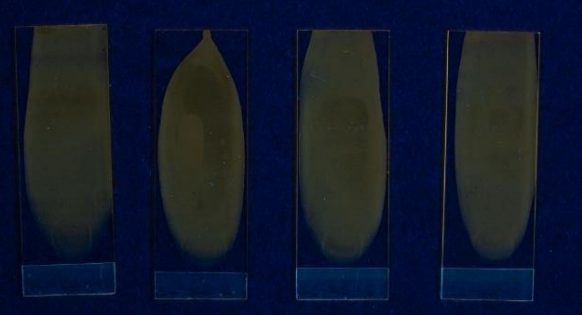
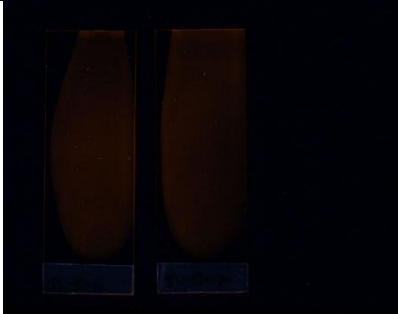
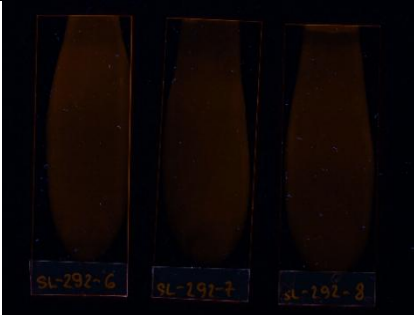
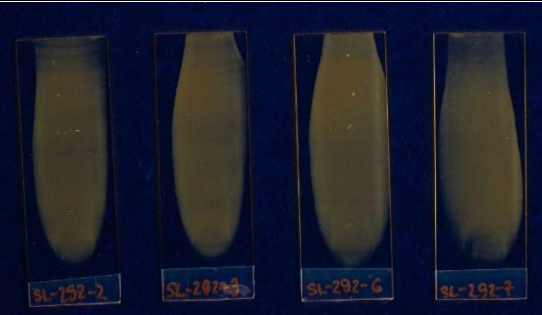
⁸ Siehe Hauptteil: 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

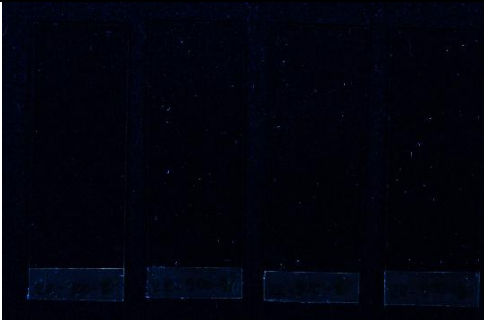
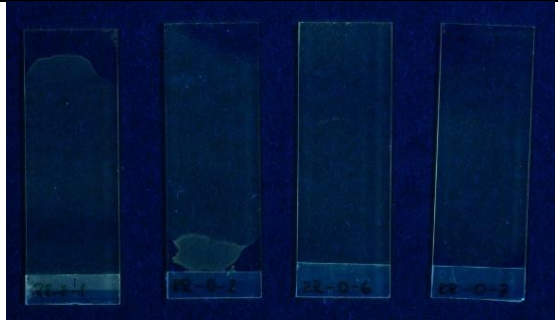
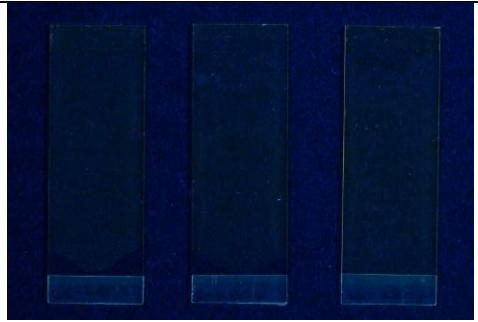
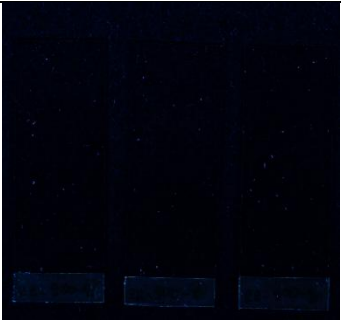
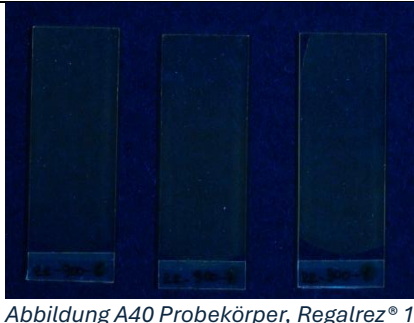
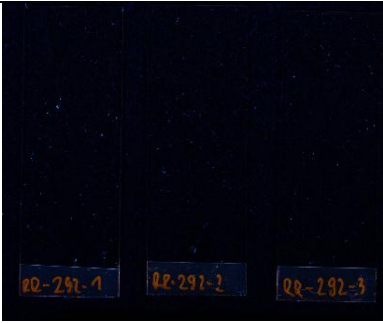
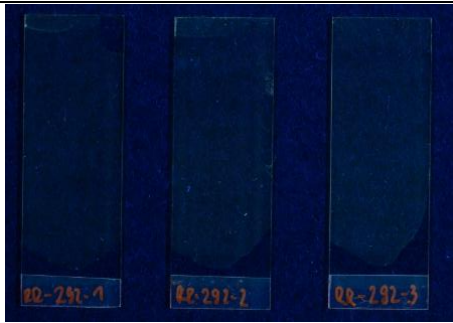
8.2 Fotodokumentation zu den optischen Betrachtungen

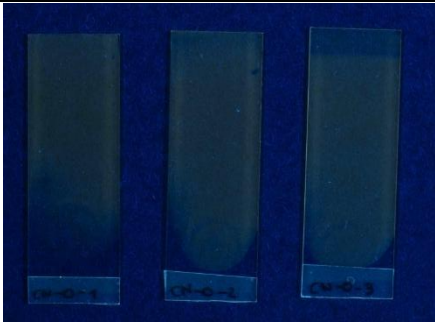
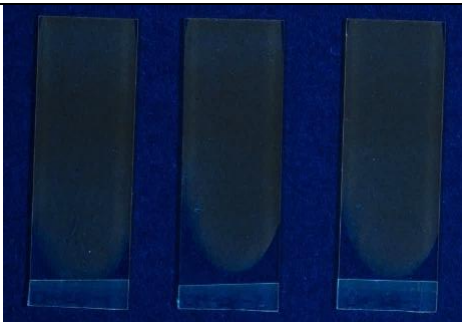
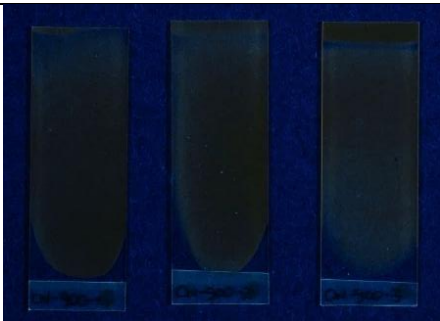
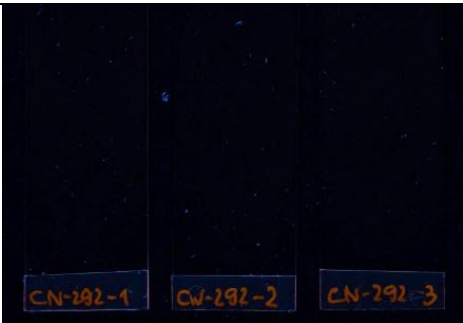
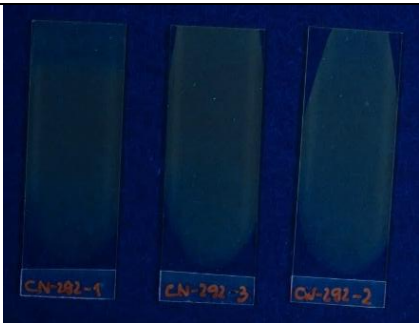
Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 Abbildung A3 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	 Abbildung A4 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A5 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	 Abbildung 6 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A7 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, VIS	 Abbildung A8 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A9 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	 Abbildung A10 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS

Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 Abbildung A11 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	 Abbildung A12 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A13 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	 Abbildung A14 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A15 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, VIS	 Abbildung A16 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A17 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	 Abbildung A18 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS

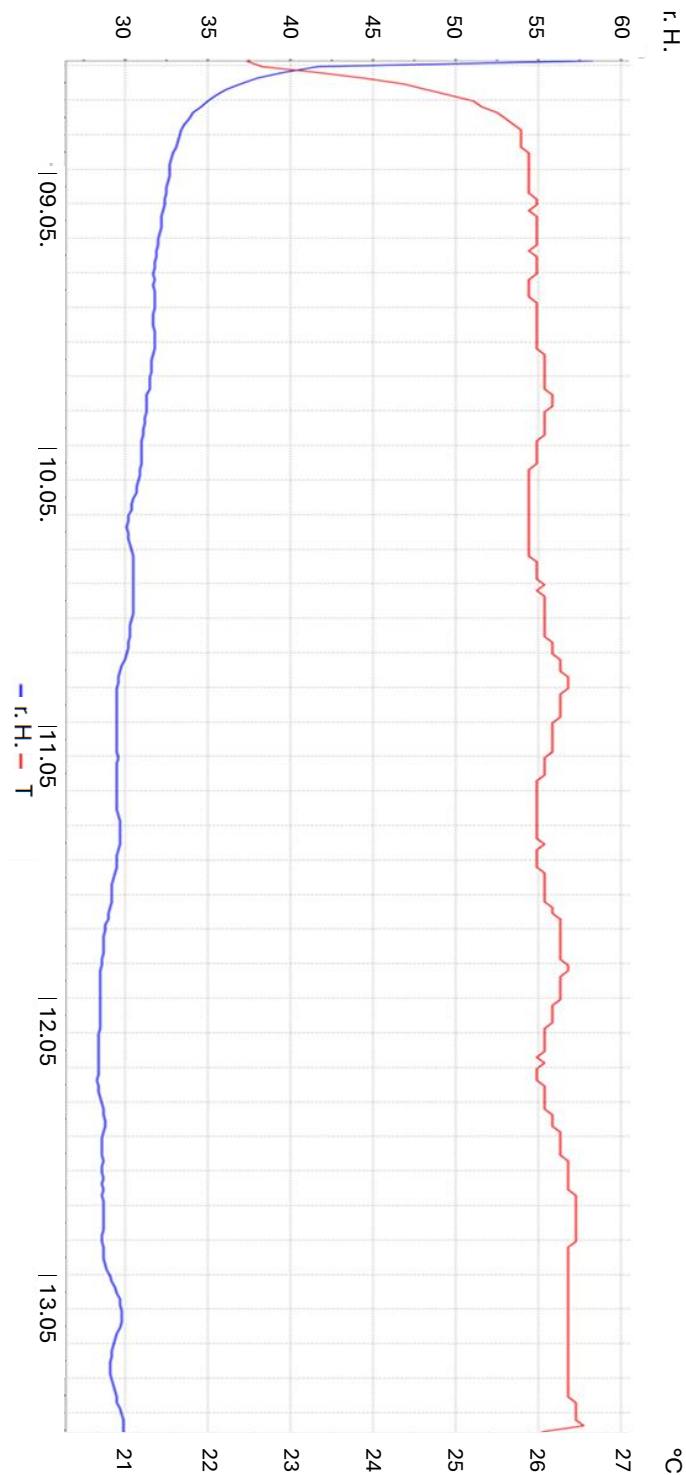
Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 Abbildung A19 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	 Abbildung A20 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A21 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, VIS	 Abbildung A22 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A23 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit Tinuvin® 900, VIS	 Abbildung A24 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS
 Abbildung A25 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit UV-Stabilisator 292, VIS	 Abbildung A26 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS

Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 <i>Abbildung A27 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A28 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A29 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A30 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A31 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A32 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, nach der Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A33 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A34 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, nach der Alterung, UV</i>

Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 <i>Abbildung A35 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A36 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A37 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A38 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A39 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A40 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, UV</i>
 <i>Abbildung A41 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV</i>	 <i>Abbildung A42 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV</i>

Proben im ungealterten Zustand	Probekörper nach der künstlichen Alterung
 Abbildung A43 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV	 Abbildung A44 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, UV
 Abbildung A45 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	 Abbildung A46 Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV
 Abbildung A47 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV	 Abbildung A48 Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, UV
 Abbildung A49 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	 Abbildung A50 Nitrocelluloselack, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV

8.3 Umgebungsbedingungen während der künstlichen Alterung mit UVC-Strahlung



Diese Klimawerte wurden mittels Datenlogger⁹ erfasst. Es wurde aller 30 min ein Messwert für Temperatur und relativer Luftfeuchte generiert.

⁹ Siehe Hauptteil: 7.4 Materialien- und Geräteverzeichnis

8.4 Datenblätter

Technisches Merkblatt

CLOU®



HOLZLACK

Schnelltrocknender Nitro-Klarlack für Holzmöbel



1 Liter reicht für ca.
8 m² je Auftrag



Für innen



Überarbeitbar nach
1 Stunden

Eigenschaften:

Schnelltrocknender Lack auf Nitrocellulose-Basis. Ergibt glatte Oberflächen bei elegantem Griff und guter Beständigkeit gegen Wasser und Spirituosen. Die Wiederanlösbarkeit der Lackoberfläche ermöglicht einfache Reparaturen.

Anwendungsbereiche:

Zur Lackierung von Möbeln im Innenbereich. Auch für Spielzeug oder Musikinstrumente wie Gitarren oder Geigen geeignet.

Inhaltsstoffe (nach VdL-RL 01):

Ester, Alkohole, Spezialbenzin, Nitrocellulose, Alkydharze, aromatische Kohlenwasserstoffe, Additive

Technische Daten

Dichte bei 20 °C: ca. 0,915 g/cm³ (DIN 51757)
Viskosität: ca. 75 s im DIN 4 mm-Becher
Geruch: nach Trocknung geruchlos

Gebindegrößen:

250 ml (nur seidenmatt) und 750 ml

Lagerung:

Trocken und kühl lagern. Vor Frost schützen. Haltbarkeit im original verschlossenen Gebinde mindestens 2 Jahre. Anbruchgebinde nach Entnahme dicht verschließen.

Entsorgung:

Nur restentleerte Gebinde zum Recycling geben. Flüssige Materialreste bei einer Sammelstelle für Altlacke abgeben (EAK-Nr. 08 01 11).

Wassergefährdungsklasse:

WGK 2 (wassergefährdend)

Warnhinweise:

Geeignete Schutzkleidung tragen. Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden. Während der Verarbeitung und Trocknung für gute Belüftung sorgen. Nicht in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen lassen. Weitere Informationen siehe Sicherheitsdatenblatt.



VERARBEITUNG

Vorbereitung:

Die zu behandelnde Holzoberfläche muss sauber, trocken sowie wachs-, öl- und fettfrei sein. Rohe Holzoberfläche mit CLOU Schnellschleif-Grundierung G1 grundieren, nach ca. 1 Stunde mit Körnung 240 anschleifen und entstauben.

Zu renovierende Fläche mit CLOU EV-Verdünnung reinigen, mit Körnung 240 anschleifen und Schleifstaub entfernen.

Verarbeitung:

(Objekttemperatur > 15 °C, Holzfeuchte 8–12 %)

Vor Gebrauch gut schütteln. Holzlack mit einem weichen Pinsel in Holztexturrichtung auftragen. Bei größeren Flächen ca. 10 % CLOU Nitro-Verdünnung V2 zugeben.

Ergiebigkeit:

1 Liter reicht für ca. 8 m² bei unbehandeltem Holz.

Trocknung:

(bei 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte)

Der Anstrich ist nach 15 Minuten staubtrocken und nach 1 Stunde überlackierbar. Während der Trocknung für gute Belüftung sorgen.

Temperatur, Luftfeuchte und Holzart beeinflussen die Trocknung. So verlängern sich die Trocknungszeiten bei niedrigerer Temperatur und höherer Luftfeuchte.

Reinigung der Arbeitsgeräte:

Verwendete Pinsel sofort nach Gebrauch mit CLOU Universal-Farblöser oder CLOU Nitro-Verdünnung V2 reinigen. Reinigungsreste ordnungsgemäß entsorgen.

Besondere Hinweise:

Lack-, Werkstück- und Umgebungstemperatur dürfen während der Verarbeitungs- und Trocknungszeit nicht unter 15 °C liegen. Die Holzfeuchte soll 8–12% betragen. Das Anlegen einer Probefläche wird empfohlen.

Technische Information

Stand Februar 2017

Diese Informationen sollen und können nur unverbindlich beraten. Sie basieren auf unseren Versuchsreihen und Erfahrungen. Da wir die Anwendung und Verarbeitung vor Ort nicht beeinflussen können, ist eine Haftung aus dem Inhalt dieses Merkblatts nicht abzuleiten. Die Verfahrensangaben müssen eigenverantwortlich den vorherrschenden Arbeits-

bedingungen angepasst werden und die Eignung der Produkte für den beabsichtigten Verwendungszweck ist ggf. durch eine Probeverarbeitung zu prüfen. Bei Unsicherheiten beraten unsere Anwendungstechniker nach bestem Wissen. Diese Beratungen sind, sofern sie nicht schriftlich bestätigt wurden, in jedem Falle unverbindlich. Wir gewährleisten selbstverständlich die Qualität unserer Produkte. Bei Erscheinen einer Neuauflage verliert diese Information ihre Gültigkeit.



Abbildung A51 Vorderseite des Nitrocelluloselackgebindes, VIS



Abbildung A52 53Rückseite des Nitrocelluloselack-Gebindes mit Inhaltsstoffen, VIS



78152 UV-Absorber 292 HALS

Allgemeine Eigenschaften:

UV-Absorber 292 dient als HALS-Stabilisator (Hindered Amine Light Stabilizer) gegen den UV-induzierten Abbau von Polymeren. Schützt Lackschichten vor der Zerstörung durch UV.

Anwendung:

UV-Absorber 292 ist ein wirksamer Lichtstabilisator für Automobil- und Industrielacke auf Basis verschiedener Bindemittel. Dazu gehören:

- Ein- und Zweikomponenten-Polyurethan
- Thermoplastische Acrylharze
- Thermisch härtende Acrylharze
- Ofenhärtende Acrylharze

Die Bewitterungsstabilität von Klarlacken und Metallic-Lackierungen kann durch Einsatz der synergistischen Kombination von UV-Absorber 292 mit UV-Absorber 900 erheblich verbessert werden.

Physikalische Eigenschaften:

Aussehen: klare, leicht gelbe Flüssigkeit

Dichte bei 20°C: 0,9905 g/cm³

Mischbarkeit: UV-Absorber 292 kann mit den meisten organischen Lösungsmitteln vermischt werden.

Mischbarkeit: UV-Absorber 292 kann mit wasserverdünnbaren Beschichtungen leicht dispergiert werden.

Handhabung und Lagerung:

UV-Absorber 292 ist wie eine Industrie-Chemikalie zu handhaben. Die folgenden Sicherheitsvorkehrungen sind bei der Handhabung genau einzuhalten:

- Für einen sauberen und gut durchlüfteten Raum sorgen.
- Kontakt mit der Haut vermeiden.
- Schutzbrille tragen, um Augenreizungen zu vermeiden.

Bei Lagerung unter 0°C kann UV-Absorber 292 kristallisieren. Durch leichtes Erhitzen kann das Produkt wieder verflüssigt werden.

Empfohlene Konzentration (bezogen auf Festkörper)

- In Klarlacken und 1-Schicht-Metallic-Lackierungen
0,5 - 1,0% UV-Absorber 292
1,0 - 1,5% UV-Absorber 900
- In 1-Schicht-Solid-Shades
1,0 - 2,0% UV-Absorber 292

Industrial Coatings, Printing & Packaging
Technical Data Sheet



Tinuvin® 900

Product Description

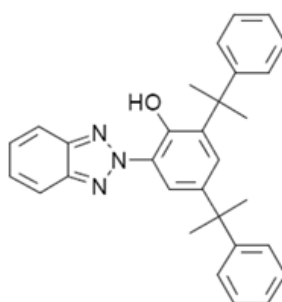
Tinuvin 900 is a UV absorber of the hydroxyphenyl-benzotriazole class developed specifically for coating systems exposed to high temperatures and/or extreme environmental stresses.

Key Features & Benefits

- Solid hydroxyphenyl-benzotriazole with excellent spectral coverage in UV region
- Excellent thermal and photo-permanence
- Excellent for improving exterior durability of powder & solvent borne coatings

Chemical Structure

Tinuvin 900 is: 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4, 6-bis (1-methyl-1-phenylethyl)phenol



Properties

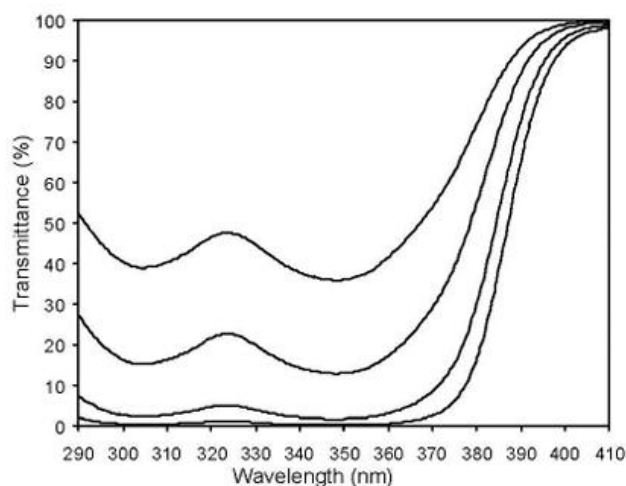
Typical Properties

CAS No:	70321-86-7
Appearance	slightly yellow powder
Molecular weight	447.6
Melting range	137 – 141 °C
<u>Solubility at 20°C (g/100 g solution):</u>	
butylcarbitol	0.2
butanol	0.3
butyl acetate	4.5
ethyglycol	1
1-methoxypropylacetate-2	2
methylethylketone	5.5
Solvesso 100 ¹	5
Solvesso 150 ¹	5
xylene	10
water	< 0.01

¹ Registered trademark of Esso

These typical values should not be interpreted as specifications.

Transmittance Spectrum
in toluene, cell thickness = 1 cm



Top Line: 0.001% Tinuvin 900, corresponds to 0.3% in a 40 µm film
Second Line: 0.002% Tinuvin 900, corresponds to 0.5% in a 40 µm film
Third Line: 0.004% Tinuvin 900, corresponds to 1.0% in a 40 µm film
Bottom Line: 0.006% Tinuvin 900, corresponds to 1.5% in a 40 µm film

Applications

Tinuvin 900 is recommended for applications such as:

- Solvent borne automotive coatings
- Coil coatings
- Powder coatings
- Hot melt adhesives

Tinuvin 900 may be used in combination with a light stabilizer of the sterically hindered amine or aminoether class (HALS) such as recommended below. These combinations give coatings superior protection against gloss reduction, cracking, blistering, delamination, and color change. The light stabilizers may be added in two-coat automotive finishes to the base and clear coat. However, according to our experience the optimum protection is achieved by adding the light stabilizer to the topcoat.

The amount of Tinuvin 900 required for optimum performance should be determined in laboratory trials covering a concentration range.

Recommend Concentrations	1.0 – 3.0%	Tinuvin 900
	+	
	0.5 – 2.0%	Tinuvin 144, Tinuvin 292, or Tinuvin 123

(concentrations are based on weight percent binder solids)

Safety

General

The usual safety precautions when handling chemicals must be observed. These include the measure described in Federal, State and Local health and safety regulations, thorough ventilation of the workplace, good skin care, and wearing of protective goggles.

Safety Data Sheet

All safety information is provided in the Safety Data Sheet for Tinuvin 900.

Storage

Please refer to the "Handling and Storage of Polymer Dispersions" brochure.

Important

The descriptions, designs, and data contained herein are presented for your guidance only. Because there are many factors under your control which may affect processing or application/use it is necessary for you to make appropriate tests to determine whether the product is suitable for your particular purpose prior to use. **NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, OR DATA MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS. IN NO CASE SHALL THE DESCRIPTIONS, DATA OR DESIGNS PROVIDED BE PRESUMED TO BE A PART OF OUR TERMS AND CONDITIONS OF SALE.** Further, you expressly understand and agree that the descriptions, designs, and data furnished by BASF hereunder are given gratis and BASF assumes no obligation or liability for same or results obtained from use thereof, all such being given to you and accepted by you at your risk.

Tinuvin is a registered trademark of BASF Group.

© BASF Corporation, 2019



BASF Corporation is fully committed to the Responsible Care® initiative in the USA, Canada, and Mexico. For more information on Responsible Care® go to:
U.S.: www.basf.us/responsiblecare_usa
Canada: www.basf.us/responsiblecare_canada
México: www.basf.us/responsiblecare_mexico

BASF Corporation
Dispersions and Resins
11501 Steele Creek Road
Charlotte, North Carolina 28273
Phone: (800) 251 – 0612
Email: CustCare-Charlotte@basf.com
Email: edtech-info@basf.com
www.basf.us/dpsolutions

8.5 Verzeichnisse

8.5.1 Bibliographie

KREMER PIGMENTE GMBH 2024

Kremer Pigmente GmbH, *Sicherheitsdatenblatt Xylol 70503* (https://www.kremer-pigmente.com/elements/resources/products/files/70503_SHD.pdf, Zugriff zuletzt am 6.6.2026).

PICCIRILLO/BLASI/LUCIANI/POLI 2014

Anna Piccirillo, Stefania de Blasi, Paolo Luciani und Tommaso Poli, „Furniture finishing: new materials and methods for restoration“, in: *Furniture Finishes. Past, present and future of transparent wood coatings*, hrsg. von Miko Vasques Dias 2014, S. 73–83.

PIETSCH 2005

Annik Pietsch, *Lösemittel. Ein Leitfaden für die restauratorische Praxis* (VdR-Schriftenreihe zur Restaurierung, Bd. 7), Stuttgart 2005.

VASQUES DIAS 2014

Furniture Finishes. Past, present and future of transparent wood coatings, hrsg. von Miko Vasques Dias.

8.5.2 Abbildungsverzeichnis und -nachweis

Alle Abbildungen im Anhang sind von der Autorin erstellt worden.

Abbildung A1 Auftrag der Überzüge mit Kastenrakel, VIS.....	86
Abbildung A2 Auftrag der Überzüge mit Knochenrakel, VIS	86
Abbildung A3 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	92
Abbildung A4 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS	92
Abbildung A5 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	92
Abbildung 6 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS.....	92
Abbildung A7 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, VIS	92
Abbildung A8 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS	92
Abbildung A9 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS.....	92
Abbildung A10 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS	92
Abbildung A11 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	93
Abbildung A12 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS	93
Abbildung A13 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	93
Abbildung A14 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS.....	93
Abbildung A15 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, VIS	93
Abbildung A16 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS.....	93

Abbildung A17 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, VIS	93
Abbildung A18 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS	93
Abbildung A19 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, VIS	94
Abbildung A20 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, VIS	94
Abbildung A21 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, VIS	94
Abbildung A22 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS	94
Abbildung A23 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit Tinuvin® 900, VIS	94
Abbildung A24 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, VIS	94
Abbildung A25 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, mit UV-Stabilisator 292, VIS	94
Abbildung A26 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, VIS	94
Abbildung A27 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV	95
Abbildung A28 Probekörper, Schellack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der Alterung, UV	95
Abbildung A29 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	95
Abbildung A30 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der Alterung, UV	95
Abbildung A31 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV	95
Abbildung A32 Probekörper, Schellack, mit Tinuvin® 900, nach der Alterung, UV	95
Abbildung A33 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	95
Abbildung A34 Probekörper, Schellack, mit UV-Stabilisator 292, nach der Alterung, UV	95
Abbildung A35 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV	96
Abbildung A36 Probekörper, Regalrez® 1126, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, UV	96
Abbildung A37 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV ..	96
Abbildung A38 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV	96
Abbildung A39 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV	96
Abbildung A40 Probekörper, Regalrez® 1126, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, UV	96
Abbildung A41 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	96
Abbildung A42 Probekörper, Regalrez® 1126, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV	96
Abbildung A43 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, Vorzustand, UV	97
Abbildung A44 Probekörper, Nitrocelluloselack, ohne stabilisierende Zusätze, nach der künstlichen Alterung, UV	97
Abbildung A45 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	97
Abbildung A46 Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900 und UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV	97
Abbildung A47 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, Vorzustand, UV	97
Abbildung A48 Nitrocelluloselack, mit Tinuvin® 900, nach der künstlichen Alterung, UV	97
Abbildung A49 Probekörper, Nitrocelluloselack, mit UV-Stabilisator 292, Vorzustand, UV	97
Abbildung A50 Nitrocelluloselack, mit UV-Stabilisator 292, nach der künstlichen Alterung, UV	97
Abbildung A51 Vorderseite des Nitrocelluloselackgebindes, VIS	101
Abbildung A52 Rückseite des Nitrocelluloselack-Gebindes mit Inhaltsstoffen, VIS	101