

Abschlußbericht

DBU-Projekt Az 34509
Projektlaufzeit: 1.03.2018 – 30.11.2020

Technologieentwicklung und Anwendungserprobung von geeigneten Holzfestigungsmitteln nach der Entrestaurierung (Ölextraktion) von stark strukturge-schädigten Holz- und Kunstobjekten unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Kriterien

Projektleiter:
Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ
Ansprechpartner:
Dipl.-Restaurator Andreas Schwabe
TU Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Naturstofftechnik
Lehrstuhl für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik
andreas.schwabe@tu-dresden.de
Tel. +49 (351) 463-40693



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34509 / 01	Referat	45	Fördersumme	124.945 €
----	-------------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Technologieentwicklung und Anwendungserprobung von geeigneten Holzfestigungsmitteln nach der Entrestaurierung (Ölextraktion) von stark strukturgeschädigten Holz- und Kunstobjekten unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Kriterien**

Stichworte Entölung, Holztränkung, Holzfestigung, Holzkonsolidierung, Holzkonservierung, Holzrestaurierung, Dekontaminierung, Holzschutzmittel, Biozide

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
33 Monate	1.03.2018	30.11.2020	1

Zwischenberichte halbjährlich

Bewilligungsempfänger	Technische Universität Dresden Helmholtzstr. 10 01062 Dresden	Tel +49 351 4633-100 Fax +49 351 4633-288	
	ausführende Stelle	Prof. Dr. André Wagenführ Technische Universität Dresden Institut für Naturstofftechnik Lehrstuhl für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik Marschnerstr. 39 01307 Dresden	Projektleitung Prof. Dr. André Wagenführ
			Bearbeiter Andreas Schwabe

Kooperationspartner IHD (Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH)
Zellescher Weg 24 | 01217 Dresden
Dr. Christiane Swaboda-
T: +49 351-4662-261
E: Christiane.Swaboda@ihd-dresden.de

HOLZ-ATELIER Karsten Püschner, Dipl.-Rest. (FH) Karsten Püschner
Röthenbacher Str. 16 k | 01762 Hartmannsdorf-Reichenau
T: + 49 37326-869848
E: denkmalpflege-pueschner@t-online.de

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Das Projektziel beinhaltet die Entwicklung einer Technologie zur schonenden Konservierung und Restaurierung stark strukturgeschädigter Holzobjekte nach ihrer Entrestaurierung (Entölung). Dabei sollen denkmalpflegerische und restaurierungsethische Kriterien angewendet und zugleich die Umweltverträglichkeit gewährleistet werden. Nach der weitgehend zerstörungsfreien Dekontaminierung und Entölung von mit chlororganischen Bioziden und Öltränkung belasteten bzw. stark strukturgeschädigten Objekten aus organischen Materialien steht die Konsolidierung der wertvollen Kunstobjekte im Fokus.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Proben- und Bohrkernentnahme an ausgewählten verölten, sich in der Entölung befindenden und entölten Objekten wurden analysiert, um den Prozess der Entölung und die Alterungsmechanismen zu untersuchen. Aktuelle bildgebende Verfahren wurden herangezogen, wie mikroskopische Betrachtung von Probenmaterial sowie Auswertung von Dünnschliffen, aber auch Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Probenmaterial, wie auch die Röntgencomputertomografie (CT) und Röntgen-Mikrocomputertomografie (Mikro-CT). Testreihen zur Ermittlung chemischer Wechselwirkungen direkt zwischen Öl-Extrakt und ausgewählten Festigungsmitteln, vorrangig Acryl- und Epoxprodukte, wurden durchgeführt. Physiko-mechanischen-Daten wie auch die Polymerisationskinetik über DSC-Messungen (Differential Scanning Calorimetry) sowie Masseveränderungen und Dimensionsstabilität nach Wasserlagerung (ASE Anti-Swell-Efficiency) wurden erfasst und ausgewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen ergaben, dass Degalan P28 als Konservierungsmittel für die Festigung verölter Kunstobjekte denkbar ist. Die Ergebnisse zeigen, dass das Acrylharz auch in Kombination mit einem Restölanteil erhöhte Festigungswerte aufweist. Dennoch sind die Werte durch das Vorhandensein des Öls stark herabgesetzt und es sollte Ziel nachfolgender Untersuchungen sein, die Entölungsverfahren weiter zu verbessern, um einen deutlich geringeren Restölgehalt in den Kunstobjekten zu erreichen.

Acrylharze weisen eine gute Alterungsbeständigkeit auf. Dennoch bleibt das Langzeitverhalten solcher Festigungsmittel im Zusammenspiel mit dem Restölanteil fraglich und sollte vor Anwendungen an originalen Kunstobjekten aus Holz umfassend untersucht werden.

Die Tränkergebnisse zeigen, dass bei Anwendung der Acrylharzfestigung in der Praxis zusätzlich begleitende Maßnahmen zur Nachbehandlung erforderlich sind. Die Thematik der Fassungen von Kunstobjekten wurde in den Untersuchungen nicht betrachtet. Sie bietet ein weiteres Forschungsfeld, da durch Fassungen sowohl die Entölung als auch die Festigungsmitteltränkungen erschwert werden. Es ist zu beachten, dass es durch die vorgeschlagene Behandlung mit Acrylharzen stets zu Beeinträchtigungen von Fassungen oder Bemalungen kommen kann, da es durch das Lösemittel zum Anquellen oder Auflösen der Malschichten kommen kann.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Publikationen:

- Nusser, A.; Röhrs, S.; Schwabe, A.; Radujkovic, S.; Bücherl, T.; Dangendorf, V.; Zscherpel, U.; Reiche, I.; Osterloh, K.: „Elucidating the distribution of organic consolidants in wood by Neutron Tomography“, in: Tagungsband DIR 2019, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, der Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS (Fraunhofer EZRT), Fürth 2019
- Eisbein, M.; Schwabe, A.: "Holzfestigung nach erfolgreicher Beseitigung von schädlichen Holzfestigungsmitteln an Kunst- und Kulturgut", in: Tagungsband, 4. Holzanatomisches Kolloquium, Institut für Holztechnologie Dresden und Technischen Universität Dresden, 2018

Vorträge:

- 10. Holzfachtreffen im Landesamt für Denkmalpflege Sachsen zur Holzkonservierung und zu den Zwischenergebnissen des DBU-Projekts zum Thema: "Technologieentwicklung und Anwendungserprobung von geeigneten Holzfestigungsmitteln nach der Entrestaurierung (Ölextraktion) von stark strukturgeschädigten Holz- und Kunstobjekten unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Kriterien", 10/ 2019
- Internationales Symposium „Digital Industrial Radiology and Computed Tomography“ der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP), der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) und des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS (Fraunhofer EZRT) in Fürth zum Thema: "Elucidating the distribution of organic consolidants in wood by Neutron Tomography", 07/ 2019
- 4. Holzanatomisches Kolloquium am Institut für Holztechnologie Dresden (IHD), TU-Dresden, zum Thema „Holzfestigung nach erfolgreicher Beseitigung von schädlichen Holzfestigungsmitteln an Kunst- und Kulturgut“, 11/ 2018
- 9. Holzfachgespräch am Landesamt für Denkmalpflege Sachsen zum Thema „Entwicklung der Holzkonservierung“ und „Bericht zum Start des DBU-Projektes zur Holzkonservierung nach erfolgter Entölung“, 10/ 2018

Fazit

Das eingesetzte Lösungsmittel 1,3-Dioxolan* weist während des Entölungsprozesses Eigenschaften auf, die vermutlich nicht nur zur Abreicherung des Öls führen, sondern die stark geschwächte Holzmatrix durch das Herauslösen von Ligninanteilen und anderen Holzinhaltstoffen weiter schwächen und zerstören.

Grundsätzlich ist eine Konsolidierung von ölhaltigen Holzobjekten mit Acrylharzen, vor allem mit Siedegrenzbenzinen als Lösemittel, möglich. Der Ölanteil im Holz beeinflusst hierbei nicht nur die Eigenschaften der Festigungsmaßnahme sondern mitunter auch das Alterungsverhalten. Zudem ist ein praktikables und effizientes Applikationsverfahren notwendig.

* chemische Verbindung aus der Gruppe der Sauerstoffheterocyclen (cyclisches Acetal), welche zur Entölung eingesetzt wird

Inhaltsverzeichnis

1.	Anlass und Zielsetzung des Projekts	6
2.	Stand der Technik	
2.1	Geschichte der Öltränkung	8
2.2	Ölgetränkte Objekte in Sachsen	9
2.3	Analysen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung ölgetränkter Objekten	10
2.4	Prozesse der Ver- und Entölung	12
2.4.1	Prozess der Öltrocknung	12
2.5	Zustandsaufnahme ölgetränkter Kunstobjekte aus Holz	13
2.6	Prozess der Entölung	16
2.7	Zustandsaufnahme entölter Kunstobjekte aus Holz	17
2.8	Bekannte Prozesse Holzfestigung nach Entölung	24
3.	Durchgeführte Arbeiten	26
3.1	Zustandsbeschreibung ausgewählter Objekte vor und nach einem Entölungsprozess	26
3.1.2	Bildgebende Verfahren	26
3.1.2.1	Lichtmikroskopie	26
3.1.2.2	Dünnschnittuntersuchung	26
3.1.2.3	Querschliffuntersuchung	30
3.1.2.4	Röntgen-Mikrocomputertomografie (Mikro-CT)	36
3.1.2.5	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	42
3.2	Chemische Analysen verölter Objekte und deren Extrakte	50
3.2.1	Untersuchungsmaterial	50
3.2.2	Untersuchungsmethoden	56
3.2.2.1	Gaschromatographische Bestimmung von Fettsäure	56
3.2.2.2	Gaschromatographische Bestimmung von VOC und SVOC (in Anlehnung an DI ISO 11890 – 2)	56
3.2.3	Ergebnisse	57
3.2.3.1	Gehalte an Fettsäuren	57
3.2.4.	Zusammenfassung	61
3.2.4.1	Nicht entölte Proben	61
3.2.4.2	Entölte Proben	61
3.2.4.3	Extrakte	62
3.3	Nachstellen der Verölung an Modellprüfkörpern	63
3.3.1	Probekörperauswahl	64
3.3.2	Kiefer – natürlich degradiert	65
3.3.3	Linde – künstlich degradiert	66
3.3.4	Herstellung eines definierten Verölungsgrades	69
3.4	Arbeiten zur Auswahl geeigneter Festigungsmittel	78
3.4.1	Petrischalenversuch zur Bestimmung der Mischbarkeit mit Ölextrakt	79
3.4.2	Härteprüfung	81
3.4.3	Dynamische Differenzkalorimetrie DDK (DSC)	84
3.5	Herstellung gefestigter Modellprüfkörper	
3.5.1	Festigungstränkung im Laborautoklaven	89
3.5.2	Makroskopische Erfolgskontrolle	92
3.5.3	Mikroskopische Erfolgskontrolle	95

3.6	Bestimmung physikalisch-mechanischer Eigenschaftskennwerte	97
3.6.1	Druckfestigkeit	97
3.6.2	Differentielle Quellung /ASE	98
3.6.3	Extrahierbarkeit organischer Verbindungen mit und ohne Klimabeanspruchung	101
3.6.4	Mikroskopische Untersuchungen nach Klimabeanspruchung	101
4.	Ergebnisse – Eigenschaften des konsolidierten Holzes	103
4.1	Beladungsgrad und Rohdichte	103
4.2	Holzfeuchte	106
4.3	Differentielles Quellungsverhalten / ASE	106
4.4	Druckfestigkeit	108
4.5	Eigenschaftsstabilität nach Klimabeanspruchung	113
4.5.1	Extrahierbarkeit organischer Verbindungen nach Acetonextraktion	113
5.	Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion	115
6.	Ausblick	116
7.	Anhang	118
7.1	Abbildungsverzeichnis	118
7.2	Tabellenverzeichnis	123
7.3	Literaturverzeichnis	124

1. Anlass und Zielsetzung des Projekts

Kunst- und Kulturobjekte aus Holz wurden gegen Ende des 19. Jahrhunderts bis Mitte des 20. Jahrhunderts zum Schutz vor Schädlingsbefällen, aber auch zur Festigung bereits geschädigter Substanz mit den verschiedensten Mitteln und Verfahren, die selten offengelegt wurden, behandelt. Bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert setzten sich Tränkungen mit heißen Leinölen durch. Im sächsischen Raum fand ein vom Vergolder Otto Puckelwartz (1876-1938) eigens zur Holzfestigung entwickeltes Gemisch, das sogenannte „Puckelin“, weite Verbreitung. Bald zeigten sich jedoch Nebenwirkungen wie starke Erweichung der Holzsubstanz, Abscheidungen dunkler Tröpfchen an der Oberfläche oder auch eine Verdunklung des Holzes. Nach über einem halben Jahrhundert führt nun die Erweichung des Holzes zu einer langsamen Zerstörung des Kunstwerkes von innen her. Manche dieser Objekte wurden durch die Tränkung mit Festigungsmitteln sehr schwer, so dass sie durch die gleichzeitige instabile Holzsubstanz durch Insektenfraß statisch beeinträchtigt sind.

Ursache dieser Erweichung der Holzsubstanz sind die Hydrolyse und Oxidation des Leinöls unter Säurebildung. Die im Leinöl enthaltenen Triglyceride gesättigter Fettsäuren werden durch Bakterien sowie Klima- und Umwelteinflüsse gespalten. Anschließend findet ein Abbau der freigesetzten höheren Fettsäuren zu niederen Fettsäuren wie Buttersäure und Valeriensäure statt, die sich durch einen intensiven, an ranzige Butter erinnernden Geruch auszeichnen. Die gebildeten Substanzen zählen zur Gruppe der VOC's, welche in starkem Maße die Luft von Räumen beeinträchtigen, in denen sich mit leinöhlhaltigen Präparaten gefestigte Objekte befinden. Die in der Luft befindlichen niederen Fettsäuren und ihre Metaboliten können an empfindlichen Objekten mit Farbfassungen und Vergoldungen, an Bronze- und Messingobjekten sowie an Objekten aus oder mit Glas Korrosionsprozesse auslösen.

Es ist zu erwarten, dass in zahlreichen Fällen die verwendeten Alt-Festigungsmittel auch mit toxischen Pestiziden zum vorbeugenden Schutz gegen Holz zerstörende Organismen versetzt worden sind. Durch die Pestizide wird die Raumluft ebenfalls erheblich belastet, woraus eine latente Gesundheits- und Umweltgefährdung resultiert. Nur wenn es gelingt, die schädigenden Substanzen aus dem Kunstgut zu entfernen, kann eine fortschreitende Zersetzung gestoppt werden und eine Stabilisierung mit unbedenklicheren Substanzen erfolgen. Zudem wird die Umwelt weniger belastet, sofern eine Reduzierung der eingebrachten Substanzen stattgefunden hat.

Seit den 1980er Jahren gibt es Bestrebungen, die schädigenden Holzfestigungsmittel zu extrahieren und die verbleibende Holzsubstanz zu festigen. Trotz erster vielversprechender Versuche konnte kein allgemein anwendbares technisches Verfahren entwickelt werden, um eine Entölung schonend und effektiv zu bewerkstelligen. Erst mit der Entwicklung einer speziellen Anlage zur Extraktion dieser öligen Holzfestigungsmittel gelang die verfahrenstechnische Entölung. Neben der Anwendung eines geeigneten Extraktionsverfahrens steht nun als vordringliche Aufgabe die nachfolgende Festigung. Mögliche neue Festigungsmittel müssen zuvor auf ihre Wirksamkeit und eventuelle Wechselwirkungen getestet werden, was nicht an der geschädigten Originalsubstanz geschehen kann.

Die heute vorrangig in der Holzrestaurierung allgemein üblichen Holzfestigungsmittel basieren entweder auf Zell- und Glutinleimen oder auf Kunst- bzw. Epoxidharzen. Leime durchdringen kaum die Objekte und führen dadurch zur „Schalenbildung“.

Kunstharze reagieren kritisch auf Öle, so dass es zur Erweichung oder auch ungenügenden Aushärtung nach einer Holztränkung mit den heute üblichen Holzfestigungsmitteln kommen kann. Zudem besteht die Gefahr, dass wertvolle Fassungen und Malschichten in Mitleidenschaft gezogen werden.

Die Extraktion ist ein zeit-, material- und energieintensives Verfahren, das sich in der Regel bis zu zwei Jahren ausdehnt. Zudem findet eine Reduzierung der schädigenden Chemikalien statt und keine vollständige Extraktion. Unklar blieb bis jetzt, wann eine Extraktion hinreichend ist und eine Festigung beginnen kann. Sinnvoll ist der Einsatz von Holzfestigungsmitteln, die nicht kritisch auf Öle und deren Abbauprodukte reagieren.

Das Projektziel beinhaltet die Entwicklung einer Technologie zur schonenden Konservierung und Restaurierung stark strukturgeschädigter Holzobjekte nach ihrer Entrestaurierung (Entölung). Dabei sollen denkmalpflegerische und restaurierungsethische Kriterien angewendet und zugleich die Umweltverträglichkeit gewährleistet werden. Nach der weitgehend zerstörungsfreien Dekontaminierung und Entölung von mit chlororganischen Bioziden und Öltränkung belasteten bzw. stark strukturgeschädigten Objekten aus organischen Materialien steht die Konsolidierung der wertvollen Kunstobjekte im Fokus.

Ziel ist dabei die Entwicklung und Erprobung eines Holzfestigungsmittels, das auch in mit Öl und dessen Abbauprodukten angereichertem Milieu einen hinreichenden Festigungserfolg gewährleistet. Zudem darf es in der Anwendung für den Bearbeiter nicht zur gesundheitlichen Gefahr werden und muss die große

Palette der öligen Holzfestigungsmittel bedienen können. Es soll den restaurierungsethischen Grundsätzen genügen und einen dauerhaft stabilen Zustand der restaurierten Objekte gewährleisten. Das bedeutet, dass die anzuwendenden Holzfestigungsmittel gut applizierbar, d.h. niedrigviskos und gut kriechfähig sind und möglichst holznahe Endeigenschaften in Bezug auf mechanisch-physikalische als auch hygrische Parameter im Verbund mit der geschädigten Holzsubstanz aufweisen.

Ein von der Firma Karsten Püschner im Rahmen eines DBU-Projektes entwickeltes und erprobtes Entrestaurierungsverfahren hat einen Lösungsansatz für im 19. und frühen 20. Jahrhundert mit öligen Holzfestigungsmitteln getränkte Kunstobjekte aufgezeigt. Erste Objekte wurden inzwischen entölt, so dass nach einer Erprobungsphase das Ziel des Projektes darin besteht, eine Lösung der bislang ungeklärten Festigung und Konservierung der entölte Kunstobjekte je nach Zerstörungsgrad zu liefern.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist aber auch die Frage zu klären, inwieweit eine völlige Entölung möglich bzw. notwendig ist und welchen Einfluss eventuell verbliebene Restbestände nach der Holzfestigung auf die Materialeigenschaften haben werden. So ist angedacht, nicht ausgehärtete noch ungesättigte Ölanteile durch entsprechende Reaktionsführung bei der Holzfestigung mit auszuhärten, um das Verfahren möglichst wirtschaftlich gestalten und Prozessabläufe abkürzen zu können.

Mit dem Projektergebnis soll es erstmals möglich sein, akut im Bestand gefährdete Kunst- und Kulturgüter aus Holz von höchstem künstlerischen Rang entsprechend denkmalpflegerischer Zielsetzungen und Anforderungen nach der Reduzierung von Schadstoffen (chlororganische Biozide und öligen Holzfestigungsmitteln) im derzeitigen Erhaltungszustand zu konservieren bzw. zu restaurieren.

Im Rahmen des Projektes soll das Hauptaugenmerk auf der Lösung der holztechnischen Fragen ohne Betrachtung möglicher Einflüsse auf Fassungen und farbliche Anstriche liegen, die grundlegend zu klären sind. Erst in einem weiteren Schritt, ggf. in einem Nachfolgeprojekt, können die vielfachen Wechselwirkungen der Festigungsmittel mit diversen klassischen Fassungssystemen eingehender betrachtet werden. Somit fiel die Auswahl auf ein akut gefährdetes Kunstwerk, das Heilige Grab (1506) von Michael Häuffner aus dem Dom St. Marien in Zwickau. Hierfür liegen bereits Materialanalysen vor und wenige Einzelteile, wie Führungsbretter und eine Skulptur- Johannes der Täufer werden zurzeit probeweise entölt. Diverse statisch konstruktive Teile mussten auf Grund der Materialerweichung vorerst durch Kopien ersetzt werden. Die entnommenen Teile wurden in der Hoffnung auf eine möglicherweise zukünftige Entrestaurierung und erneute Festigung aufbewahrt. Das Objekt zählt zu den bedeutendsten sächsischen sakralen Kunstwerken aus vorreformatorischer Zeit. Nachdem an Modellprüfkörpern die Eingrenzung erfolgversprechender Festigungsmittel erprobt wurde und feststeht, welcher Restölanteil tolerabel ist, sollen Festigungsversuche an den derzeit nicht verwendeten und in der Entölung befindlichen originalen Teilen von Führungsbrettern vorgenommen werden. Ziel ist es, die gleichfalls aktuell entölte Skulptur des Heiligen Johannes des Täufers beispielhaft zu konservieren und so zu stabilisieren, dass ihre Tragfähigkeit ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen wieder gewährleistet ist.

Dennoch muss die Kompatibilität der denkbaren Festigungsmaterialien auch für Fassungen und Malschichten von Anfang an im Blick bleiben. So soll das gefasste Objekt, der Bekrönungengel aus dem Altar der Goldenen Marie der Dreifaltigkeitskirche in Görlitz, voruntersucht und dokumentiert, sowie die Extraktion im Rahmen des Projektes durchgeführt werden. Die sich daraus ergebenden restauratorisch konservatorischen Fragestellungen sollen gesammelt und dokumentiert werden.

2. Stand der Technik

2.1 Geschichte der Öltränkung

Holz ist ein natürlicher Rohstoff, der verwittert und sich zersetzt, wenn er längere Zeit ungeschützt Einwirkungen wie UV-Strahlung, Niederschlag, Temperaturschwankung und Luftverschmutzung ausgesetzt ist. Jedoch auch Schadinsekten und Mikroorganismen fördern die Degradierungsprozesse.

Lange Zeit wurde Holz als Bildträger von Tafelbildern und Retabeln nicht als Teil des Kunstwerkes angesehen und im Fall zerstörter Holzstruktur durch neues Material ersetzt. Sachsen nahm mit der Gründung der Königlich Sächsischen Kommission¹ in den 90er Jahren des 19. Jahrhunderts eine wichtige Rolle bezüglich der Holzkonservierung ein und setzte den Gedanken durch, dass auch der Bildträger ein Teil des Kunstwerkes und damit erhaltenswert ist.² Es entwickelte sich das Bewußtsein geschädigte Holzsubstanz an Kunstwerken zu erhalten und konservatorisch zu behandeln. Die allgemeine Praxis des Austauschens von biologisch geschädigten Kunstwerken führte zu einem erheblichen Verlust an Originalen, wodurch Objekt- und Kulturgeschichte verloren gingen.

Erste Versuche zur Geschichte von öligen Holzfestigungsmitteln fanden bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts statt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in der staatlichen Denkmalpflege in Sachsen durch Anobien beschädigte Kunstwerke wie Altäre und Skulpturen mit Wachsen behandelt. Der Auftrag diente dazu, das Holz vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen und außerdem vom Holz gelöste Fassungsschichten zu festigen. Das heiß aufgetragene Wachs führte zu Dunkelfärbungen am Holz und zu optischen Veränderungen in der Polychromie und der Vergoldung.

Tränkungen und intensive Anstriche gegen Holzwurmbefall erfolgten durch Petroleum („Solaröl, Leuchtöl“) in den Jahren 1904/05, jedoch wurde diese Anwendung bereits in der historischen Literatur als erfolglos eingeschätzt.³

Ab 1904 wurde der Gebrauch pflanzlicher Öle favorisiert, wobei vor allem Leinöl, das mit oder ohne Sikkativ versetzt, zur Anwendung kam. Die Behandlung der Kunstobjekte erfolgte in heißen Bädern aus Leinöl und Leinölfirnis. Die siedend heiße Flüssigkeit sollte leicht in das Holz eindringen und hatte außerdem die Funktion, eine weitere Zerstörung durch Anobienbefall zu verhindern, was mit Phenolzusätzen („Karbolsäure“) unterstützt wurde. Als Zeitangabe für das sogenannte „nasse Imprägnierverfahren“ formulierte Bachmann „Stunden bis Tage“. ⁴ Diese Methode führte zur Abscheidung von Tröpfchen auf der Holzoberfläche, was auch nach Jahren noch auftrat.²

Jantsch schlug 1912/13 die Behandlung mit kaltem statt mit bisher heißem Leinöl vor und beschrieb, dass durch den Zusatz von Phenol („Karbolsäure“) und französischem Terpentin die Mischung eine geringere Viskosität erhält und dadurch leichter in das Holz eindringt.⁵ In der Literatur fanden Leinöl und Leinölfirnis Erwähnung, die mit Terpentinen verdünnt wurden, wobei französisches und deutsches („Kienöl“) beschrieben wurden und als Ersatz Scherbenzin mit einem Siedebereich von 145-200°C („Sangajol“) und 1,2,3,4-Tetrahydronaphthalin („Tetralin“) dienten.^{2,3}

Auf der Grundlage dieser Erfahrungen erfolgte durch den Vergolder Otto Puckelwartz im Landesamt für Denkmalpflege Sachsen die Entwicklung eines Festigungsmittels, mit dem Holz durch Aufstreichen und Tränken imprägniert wurde und dessen Zusammensetzung Bachmann 1926/27 als ein Gemisch auf der Basis von Leinölfirnis mit Bernsteinlack und Kampferöl beschrieb.² Diese kalt aufgetragene Mischung wurde bereits vor dem ersten Weltkrieg eingesetzt. Die Zusammensetzung des Festigungsmittels könnte im Laufe der Anwendungszeit verändert worden sein, so dass z.B. Bernsteinlack durch Kolophonium ersetzt wurde. Es wurde eine Tränkzeit von ein bis sechs Stunden angegeben und eine Aushärtung nach zwei bis fünf Wochen beobachtet, nach welcher das Holz bearbeitbar war. Eine endgültige Trocknung erfolgte erst nach Monaten, weswegen nach Möglichkeiten gesucht wurde, diese Zeit zu verkürzen.² Wegen des deutlich schnelleren Trocknungsverhaltens erfolgten Versuche mit Chinesischem Holzöl, deren Ergebnis Jantsch veranlasste, nur noch Holzöl einzusetzen, das er mit französischem Terpentinöl zu einer 20 %-Lösung verdünnte.³ Tendenzen, Imprägnierungsmittel zur Holzfestigung einzusetzen, wurden auch andernorts verfolgt, wie das Beispiel der Harzlösung Sommerfeld am Möbelbestand der Preußischen Schlös-

¹ Diese Kommission übernahm einen denkmalpflegerischen Aufgabenbereich des ‚Königlich Sächsischen Altertumsvereins‘ und wurde 1917 umbenannt in ‚Landesamt für Denkmalpflege‘. (Magirus, S. 151, S. 195, S. 144 1987)

² EISBEIN, M.: *Dekontaminierung und Dekonsolidierung von schädlichen Holzkonservierungsmitteln an Kunst- und Kulturgut*. in: Denkmalpflege in Sachsen, Jahrbuch 2010, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege, S. 85, 2010

³ Kirchaktenarchiv Dom Zwickau, Bauakten

⁴ BACHMANN, W.: *Das Imprägnieren wurmkranke Hölzer*. in: Zeitschrift für Denkmalpflege I, S. 153-157, Wien, Berlin 1926/27

⁵ JANTSCH, C.: *Versuch in der Behandlung alter Holzschnitzereien und Malereien auf Holz*. in: Der Kunstmarkt, Beilage zur Kunstchronik. Heft 8, Leipzig 1912/13, S. 83/84

ser zeigt und Mischungen bei der Hjortspring Collection.^{6, 7, 8}

In einer Veröffentlichung von C. Jantsch aus den dreißiger Jahren wurde auch eine Mischung aus Leinöl, Holzöl und französischem Terpentin vermerkt.⁹

Bachmann erwähnte ein Gemisch, das zur Holzfestigung von Otto Puckelwartz als Mitarbeiter des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen hergestellt wurde, und das zur Volltränkung an Objekten empfohlen wurde. In der Literatur findet sich keine genaue Information zu den Bestandteilen des sogenannten „Puckelins“.²

Durch die Angabe von Bachmann ist zudem bekannt, dass durch den Sohn Otto Puckelwartz die Thematik der Holzfestigung nach 1945 an den Staatlichen Museen zu Berlin fortgesetzt wurde. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden alternative Materialien zur Holzfestigung gesucht. Synthetische Produkte der Industrie fanden ihre Verwendung und führten somit zu immer seltener durchgeführten Tränkungen mit Leinöl basierten Materialien.

2.2 Ölgetränkte Objekte in Sachsen

Die Recherche zu eingesetzten Festigungsmitteln und geschädigten Objekten in Sachsen wurde mit Hinzunahme durch vorangegangener Forschungsarbeiten und Restaurierungsdokumentationen durchgeführt. Einen umfangreichen Überblick hierzu liefert Schönemann¹⁰, der hier chronologisch zusammengefaßt ist und ergänzt wurde. Berücksichtigt wurden Angaben, die sich auf Konservierungsmaßnahmen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts beziehen. Außerdem wurden die behandelten Kunstwerke nach Verwendungszeitraum und Behandlungsart tabellarisch erfaßt.

Ort / Objekt	Jahr	Konservierungsmaßnahme mit Quellenangabe
Dom Zwickau; Heiliges Grab	1832/33	Behandlung mit „Koloquintenwasser“ ¹¹
	1890/91	Behandlung mit Terpentinöl, Firnis, Mattlack ¹²
	1904/05	Tränkung mit Petroleum („Solaröl“) ¹³ Tränkung in Leinöl mit Ochsen-galle („kochen-der Masse“) über mehrere Tage ¹¹
Epitaph Teuffel	1937/38	Reinigung und Grundierung durch O. Puckelwartz ¹⁴
Wohlgemut-Altar	1832	Behandlung mit „Gummiwasser“ ⁹
	1890	Behandlung mit Öl und Mattlack ¹⁰
	1913/14	Imprägnierung durch O. Puckelwartz ¹⁵
	1914-1932	vermutlich Reinigung und Sicherung befallener Schnitzereien und Bildtafeln ¹⁶
Kirche Rothschönberg Altar	1907	Behandlung der gesamten Fassung mit einem Harzüberzug, vermutlich Schellack ¹⁷
	1921/22	Sicherung der Fassung vor der Imprägnierung mit Glutinleim, dann (vermutlich) Volltränkung durch O. Puckelwartz ¹⁸
Böhlen, Christophoruskirche (heutiger Standort)	1933	Imprägnierung durch O. Puckelwartz ¹⁹

⁶ WEIDNER, T.; EICHNER, U.; HECK, G.; UNGER, A.: *Die Harzlösung Sommerfeld. Ein Berliner Holzfestigungsmittel der dreißiger Jahre.* in: *Restaura* 6, 1999, S. 453-459

⁷ EICHNER, U.; ALIMORADIAN, S.; OTTO, K.: *Holz.* in: *Die Kunst zu bewahren.* Leipzig 2006, S. 193-197

⁸ RINGGAARD, M.: *Meadeløser om Konservering* 3, 1989, S. 110

⁹ JANTSCH, C.: *Behandlung alter wurmzerstörter Holzschnitzereien und Malereien auf Holz.* in: *Deutsche Kunst und Denkmalpflege* 9, Berlin, Wien 1934, S. 119-122

¹⁰ SCHÖNEMANN, A.; EISBEIN, M.; UNGER, A.; DELL'MOUR, M.; FRENZEL, W.; KENNDLER, E.: *Historic Consolidants for Wooden Works of Art in Saxony.* in: *STUDIES IN CONSERVATIONS* 53, 2008, S. 118-130

¹¹ HILDEBRAND, W.T.W.: *Die Erneuerung der Wohlgemutschen Altargemälde in der Hauptkirche St. Mariae zu Zwickau.* in: *Archiv merkwürdiger Urkunden und Nachrichten aus alter und neuer Zeit*, Band 1, Heft 1, S. 36-46, Leipzig 1833

¹² Kirchaktenarchiv Dom Zwickau, Bauakten

¹³ Kirchaktenarchiv Dom Zwickau, Akten des Bauausschusses, Rechnungsbücher, 1907

¹⁴ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte Z. 1,3. Blatt 46b/55, Dr. Henschel/Dr. Bachmann, 1937

¹⁵ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte A 67, Blatt 92

¹⁶ Kirchaktenarchiv Dom Zwickau, Bauakten

¹⁷ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte R 30, Blatt 6/7/17, 1907

¹⁸ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte R 30, Blatt 36/39, 1920

¹⁹ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte B 22, Blatt 21/22/24/41, Akte Z 28 Blatt 27/28/30/34/35

12 Heiligenfiguren		
Chemnitz-Ebersdorf, Stiftskirche. Altar	ca. 1911	Tränkung des Altars mit öligem Festigungsmittel ²⁰
Chemnitz-Glösa, St. Jodokus Altar	um 1920	Holzfestigung ²¹
	1928/30	Imprägnierung durch O. Puckelwartz ²²
Rochlitz, St. Kunigunde Hochaltar	1863	Restaurierung ²³
	ca. 1933	erneute Restaurierung
Ehrenfriedersdorf, St. Niklas; Altar	ca. 1918	Behandlung durch O. Puckelwartz ²⁴
Görlitz, Dreifaltigkeitskirche Engelsfigur, Altar	1909/10	Tränkung mit öligem Festigungsmittel ²⁵
Kamenz, St. Marien Kirche Hochaltar	1910	Tränkung mit öligem Festigungsmittel ²³

Tab. 1: Vermeintliche Konservierungsmaßnahmen an Holzobjekten in Sachsen nach Schönemann

Zudem sind die aus den Überlieferungen der Vorgängerprojekte folgende Objekte nachweislich mit ölhaltigen Festigungsmitteln getränkt worden:

- Mehrzahl der Peter-Breuer-Altäre (z.B. Pieta im Zwickauer Dom, Marienaltar Burg Gnadstein)
- Objekte des Bildhauers Heuffner
- kompletter Museumsbestand von Zwickau
- Vielzahl von Renaissance-Objekten (z.B. Epitaphien in der Zwickauer St. Marien Kirche)

2.3 Analysen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung ölgetränkter Objekten

In der folgenden Tabelle wurden nur die Trivialnamen, welche sich aus den Analysen der Arbeit von Schönemann 2008 ergaben.

Objekt	Methode	Behandlungsmittel	Detektierte Bestandteile
Dresdener Puckelin	GC/MS	Holzöl und/oder Leinöl und Harz	freie Fettsäuren als auch terpenoide Verbindungen aus Leinöl, Leinölfirnis und Campheröl
Puckelin-Präparates aus den Staatlichen Museen zu Berlin			Erucasäure aus Rapsöl
Zwickau Dom Heiliges Grab	GC/MS	Holz- oder Leinöl	freie Fettsäuren wie ÖI-, Palmitin und Stearinsäure Autoxidationsprodukte (Acetale, Furane, Azelainsäure)
Epitaph Teufel	FTIR	stark gealtertes ÖL	

²⁰ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte G 38, Blatt 3/4

²¹ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte G 38, Blatt 3/4/13 ff.

²² Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte G 38, Blatt 16

²³ PFAU, C.: Die Rochlitzer Kunigundenkirche. Rochlitz 1929

²⁴ Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen, Akte A 67, Blatt 67

²⁵ EISBEIN, M.: Referent, Abteilung III Wiss. Fachdienste; Referat 4 Restaurierung; Holzrestaurierung, persönliche Auskunft

Wohlgemut Altar	GC/MS	Holzöl und Leinöl, Harzzusatz (Kolophonium)	
Kirche Rothsönberg Altar	GC/MS	Holzöl und Harze	
Chemnitz-Ebersdorf, Stifts- kirche Altar	GC/MS	Holzöl oder Leinöl, vermutlich Wachs- zusatz	
Görlitz, Dreifaltigkeitskirche Engelsfigur, Altar	GC/MS	Holzöl oder Leinöl, Harzzusatz (Kolophon- ium)	
Kamenz, St. Marien Kirche Hochaltar	GC/MS	stark gealtertes Öl, Harzzusatz	

Tab. 2: Analysen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung ölgetränkter Objekten

Durch die GC/MS-Analysen an Proben des HI. Grabes in Zwickau im Rahmen des DBU-Projektes AZ 08118 aus dem Jahr 2000 wurde die Anwesenheit freier Fettsäuren wie ÖI-, Palmitin- und Stearinsäure eindeutig nachgewiesen. Außerdem waren Autoxidationsprodukte (Acetale, Furane, Azelainsäure) in geringen Mengen vorhanden. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, daß der Hauptabbauweg des fetten Öles im Heiligen Grab in einer Spaltung der Glycerinester bestand und eine typische Autoxidation (Trocknung) und damit Festigung des Holzes nur in geringem Umfang stattfand.²⁶

Das Vorhandensein von Terpenen und einer Substanz, die am ehesten einem abgebauten, aber nicht getrockneten Leinöl oder Leinölfirnis ähnelt sprechen gegen den Einsatz von Puckelin zur Stabilisierung des Heiligen Grabes und bestätigen die Angaben in den Zwickauer Kirchenakten, in denen von einer Behandlung mit kochendem Leinöl die Rede ist.²⁷

Die in der Literatur angegebene Zusammensetzung des Puckelins (Leinölfirnis, Bernsteinlack und Campheröl) konnte anhand einer noch in der Dresdener Gemäldegalerie vorhandenen Puckelin-Abfüllung im Grundsatz bestätigt werden. Durch GC/MS wurden sowohl freie Fettsäuren als auch terpenoide Verbindungen nachgewiesen, die sich Leinöl bzw. Leinölfirnis und Campheröl zuordnen lassen.²⁸

²⁶ DBU-Projekt Az 08118: Dekontaminierung öliger, chlorkohlenwasserstoffhaltiger Holzschutz- und Holzfestigungsmittel aus musealen und denkmalgeschützten Objekten, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2000, S. 38

²⁷ DBU-Projekt Az 08118, 2000, S. 38

²⁸ DBU-Projekt Az 08118, 2000, S. 39

Die Analyse eines weiteren Puckelin-Präparates aus den Staatlichen Museen zu Berlin ergab jedoch Abweichungen vom Dresdener Puckelin. Das Vorhandensein von Erucasäure weist auf den Einsatz von Rapsöl hin.²⁹ Dies deckt sich mit den Angaben einer weiteren Untersuchung Schönemanns, welche ölige Komponenten Rapsöl oder Meeresöl (Fisch- oder Walöl) identifizieren konnte.³⁰

Puckelin war demnach in jeder Zeit seiner Verwendung kein einheitlich zusammengesetztes Produkt.

2.4 Prozesse der Ver- und Entölung

2.4.1 Prozess der Öltrocknung³¹

Fette und fette Öle bestehen aus Glycerin und verschiedenen Fettsäuren/Carboxylsäuren, die durch Veresterung miteinander verbunden sind. Das Produkt der Veresterung sind Triglyceride. Trocknende Öle zeichnen sich durch einen hohen Gehalt an Triglyceriden ungesättigter Fettsäuren aus. Die darin enthaltenen Doppelbindungen ermöglichen die chemische Erhärtung von trocknenden Ölen. Beispiele dafür sind das Mohnöl, das chinesische Holzöl und, wohl am bekanntesten, das Leinöl.

Am Beispiel des Leinöls soll das Prinzip der chemischen Trocknung erläutert werden. Sie setzt sich zusammen aus der Aufspaltung der Doppelbindungen durch Einlagerung von Sauerstoff und der damit einhergehende Vernetzung der Ketten untereinander. Diese Vorgänge werden Autooxidation und Polymerisation genannt.

Der Prozess beginnt mit der Auslösung einer Radikalkette, die durch Lichteinwirkung oder Metallkomplexe katalysiert wird. Durch die Einlagerung von Sauerstoff und Wasserstoff reagieren die Fettsäure-Allylradikale zu Hydroperoxiden. Der Zerfall der Hydroperoxide initiiert die Polymerisationsreaktion, die Vernetzung (Abb.: 1).

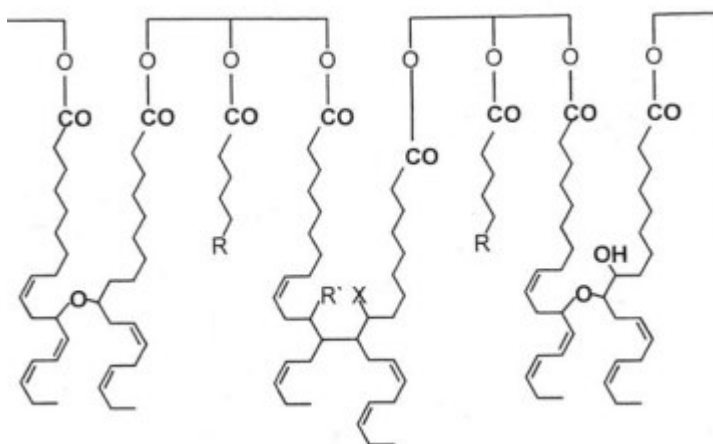


Abb.1: Schematische Strukturformel eines getrockneten Ölfilms

Die chemische Trocknung kann gestört werden, indem beispielsweise ein Mangel an Sauerstoff vorliegt. Statt der Vernetzungsprozesse zersetzt sich das Triglycerid durch Hydrolyse (Abb.: 2) in seine Bestandteile. Untersuchungen zu Folge können vom Glycerid isolierte Fettsäuren keinen festen, elastischen Film ausbilden. Stattdessen entsteht eine klebrige, leicht ethanollösliche Masse.

²⁹ DBU-Projekt Az 08118, 2000, S. 39

³⁰ SCHÖNEMANN, u.a., 2008, S. 122

³¹ WUNDERLICH, C.-H.; HILFRICH, U.; WESER, U.: Schonende Abnahme von gealterten Leinölfirnissen, Ein neues Konzept mit Alkali-PEG-Lösung. in: Restaura, Heft 1, S. 46-54, 2003

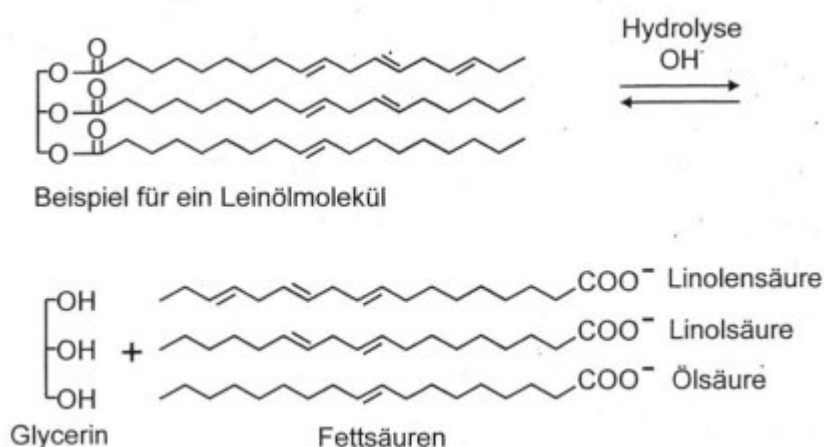


Abb. 2: Hydrolyse eines Leinölmoleküls

2.5 Zustandsaufnahme ölgetränkter Kunstobjekte aus Holz

Das Schadensbild einer getränkten Skulptur hängt von den enthaltenen Substanzen ab. Die variierende Zusammensetzung der historischen Holzschutz- und Holzkonservierungsmittel wirken sich unterschiedlich auf die Alterung des Holzes aus. Analysen zeigen, dass gleiche Rezepturen den gleichen Schaden verursachen.³²

Die Tränkung mit Öl hat meist eine Kette an Schäden zur Folge. Das Öl dringt durch stunden- bzw. tage- lange Behandlung sehr tief in das Innere des Kunstwerks ein. Jedoch findet die Oxidation nur an der Oberfläche statt. Das ausgehärtete Öl verhindert die Sauerstoffzufuhr in der Tiefe, so dass sich auch über Jahre hinweg flüssiges und meist stark abgebauten Öl im Objekt befindet.

Die enorme Gewichtszunahme kann eine Veränderung der Statik, vor allem bei ausladenden Objekten hervorrufen wie beispielsweise bei Altären. So kann es vorkommen, dass das Bildwerk schon nach kurzer Zeit sein eigenes Gewicht nicht mehr tragen kann, sich verformt, durchbricht oder einzelne Teile verloren gehen. Begünstigt wird dieser Vorgang durch die Erweichung des Holzes und der Zersetzungsprodukte der fetten Öle. Zu den typischen Zersetzungsprodukten von trocknenden Ölen gehören vor allem teilhydrolysierte Triglyceride, freie Fettsäuren, Dicarbonsäuren, Aldehyde, aber natürlich auch der polymerisierte Teil mit kurz-, langkettigen und vernetzten Bruchstücken. Der pH-Wert der Holzsubstanz sinkt gegenüber dem natürlichen sauren Medium Holz.

Der Abbau der langkettigen Fettsäuren zu niederen Fettsäuren (z.B. Buttersäure, Valeriansäure) belastet nicht nur die Luft, sondern kann auch Korrosionsprozesse an Fassungen und Metallauflagen bewirken.³³

Die Zwischenprodukte schaffen ein saures Milieu, welches die Zerfaserung der Holzbestandteile auslöst. Ist die Zerfaserung, oder auch Mazeration, weit vorgeschritten, gefährdet sie die gesamte Stabilität des Kunstwerkes. Zudem kommt es zur massiven Erweichung der noch vorhandenen Holzsubstanz.

Nicht zuletzt wird der ästhetische Gesamteindruck beeinträchtigt. Absonderungen an der Oberfläche zeigen sich in Form eines klebrigen Films (Abb. 3) und einer Tropfenbildung (Abb. 4), lange Jahre nach der Öltränkung. Die Holzoberfläche und die Fassung können sich verdunkeln (Abb. 5). Mal- und Fassungsschichten korrodieren oder heben sich großflächig ab (Abb. 6).

³² SCHÖNEMANN, u.a., 2008, S. 118

³³ EISBEIN, 2010, S. 86



Abb. 3: klebriger Film auf der Oberseite des Schleierbretts aus Ebersdorf (Quelle LfDS)



Abb. 4: Tropfenbildung an der Oberfläche durch austretende Öl-Harz-Lösung, Kruzifix Zwickau (Quelle LfDS)



Abb. 5: starke Verbräunung der Fassung der rechten Figur, HI. Katharina (restauriert) und HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)



Abb. 6: Abheben der Fassung durch Verölung, Engelsfigur Dreifaltigkeitskirche Görlitz (Quelle LfDS)

2.6 Prozesse zur Entölung

Die Entölung ist eng mit der Dekontaminierung halogenorganischer Verbindungen auf ölicher Basis verbunden. Verschiedene Forschungsprojekte zur Extraktion ölhaltiger Holzfestigungs- und -schutzmittel, unter anderem durch superkritisches Kohlenstoffdioxid und Lösungsmitteln wie 1,3-Dioxolan, zeigen die Anstrengung auf dem Gebiet der Holzkonservierung Kunst- und Kulturgut aus Holz zu erhalten.

Kohlenstoffdioxid entwickelt oberhalb des kritischen Punktes, über einem Druck von 73 MPa und einer Temperatur von 31,1°C besonders gute Löseeigenschaften. Das bei Raumtemperatur gasförmige CO₂ ist am kritischen Punkt eine extrem viskose Flüssigkeit. Jedoch ist die Durchsatzrate relativ gering und nicht für jede polychrome Fassung eines Bildwerkes geeignet. In der Fassung befindliche ölige oder harzige Bestandteile werden gleichermaßen mit angelöst und extrahiert. Leim- oder Temperafarben sowie Polimentvergoldungen lassen sich hingegen als stabil bezeichnen.

Eine höhere Extraktionsrate wird durch die Behandlung mit Lösemitteln in einer Unterdruck-Kammer erreicht. Lösemittel wie 1,3-Dioxolan bzw. Dichlormethan wurden 1986 erstmals zur Extraktion ölgetränkter Kunstobjekte verwendet.³⁴ Flüssige Lösemittel beeinträchtigen Farbfassungen stark, so daß die damalige Methode der Tränkung der Objekte in Lösemittelbäder abgewandelt werden mußte. Durch die Änderung des Aggregatzustandes von flüssig zu gasförmig blieben die Löseeigenschaften erhalten ohne die Fassung derart zu schädigen. Dies führte vor allem bei der Verwendung von 1,3-Dioxolan in einem abgeschlossenen System zum Erfolg. Die im Rahmen des DBU-Projektes AZ 28606 entwickelte Anlage von Dipl.-Restaurator Karsten Püschner existiert seit 2015.

Die schonende Entölung ist ein langwieriger Vorgang, da zunächst die Sättigung des Holzes mit dem Lösemittel erreicht werden muss, bevor der eigentliche Löse- bzw. Austauschprozess beginnen kann. Die Dauer des Eindringens des Lösemittels und das Abtropfen der Verölung werden durch den Erhaltungszustand und die kunsttechnologische Bearbeitung des Kunstwerks beeinflusst. Gefasste Objekte benötigen eine längere Zeit der Entölung, da die Fassungsschicht als Sperrschicht fungiert.

Die Entölung in der Anlage von Dipl.-Restaurator Karsten Püschner dient zurzeit als einzige nachhaltige Methode, um die Zerfallsprozesse durch die Verölung zu stoppen.

³⁴ BÖSENBERG, J.: Die Konservierung der spätgotischen Holzfigur der HI. Anna Selbdritt und die Konservierung und Restaurierung des linken Flügelschreins des Barbaraaltars von Peter Breuer aus der Friedhofskapelle zu Lichtentanne. Diplomarbeit HfBK Dresden, 1986

DBU-Projekte

Az 08118 Dekontaminierung öliger, chlorkohlenwasserstoffhaltiger Holzschutz- und Holzfestigungsmittel aus musealen und denkmalgeschützten Objekten, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2000

Az 17314 Detoxifizierung Holzschutzmittel belasteter national wertvoller Kunstobjekte mit Farbfassungen und Oberflächenveredelungsschichten am Beispiel des Epitaphs von Döben und des Heiligen Grabes des Stiftes Neuzelle, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2003

AZ 28606-45 Entwicklung und modellhafte Erprobung einer Technologie zur zerstörungsfreien Extraktion und Restaurierung von biozid und umweltgeschädigten Holzobjekten, Dipl.-Rest. Karsten Püschner, 2015

Az 30165 Analyse historischer Carbolineumimprägnierungen als Grundlage konservatorischer Dekontaminierung und modellhafte Erprobung neuer Sanierungstechnologien, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2015

2.7 Zustandsaufnahme entölter Kunstobjekte aus Holz

Die Entölung ölgetränkter Kunstobjekte durch die Anlage von Dipl.-Restaurator Karsten Püschner führt zu guten Ergebnissen, was die Extraktionsrate betrifft. Durch die Entfernung der Ölkomponente aus der Holzsubstanz, auch wenn sie zuvor nicht polymerisiert war und somit keine Festigkeitserhöhende Wirkung erzielte, führt zu neuen Materialeigenschaften dieser. Der Degradierungsgrad des Holzträgers vor der Öltränkung und die Wechselwirkungen des eingebrachten Öls mit dem Holz sind ausschlaggebend für den Zustand nach der Entölung.

Insofern keine gesunde anatomische Holzstruktur mehr im Gefüge eines Kunstobjektes vorhanden ist, führt die Entölung dazu, daß die Holzsubstanz (Bohrmehl) keine Bindung aufweist. Zudem kann das Erscheinungsbild, sei es durch eine Fassung, oberflächlich intakt sein. Die Fassung stellte in diesem Fall nur noch eine Schalenartige Hülle dar. Auch holzsichtige Objekte können oberflächlich bis auf vorhandene Ausflugslöcher strukturell ein stabiles Gefüge suggerieren. Dies führt zu nicht sichtbaren großen statischen Problemen von Kunstobjekten und kann bis zum Totalverlust führen bzw. stellen eine restauratorische Maßnahme vor große Herausforderungen (Abb. 7-10, 15/16).

Die Restanteile des Öls im Kunstobjekt können den Zustand durch weiterlaufende Alterungsprozesse weiterhin verschlechtern und nach einer restauratorischen Maßnahme durch neu eingebrachte Festigungsmittel beeinflussen (Abb. 11/12).

Die Einlagerung sowie Konzentration von Ölresten in der Oberfläche bzw. Fassung von Kunstobjekten ist ein weiteres zu beobachtendes Phänomen. Hierbei kann es zu Schalenbildungen und Abplatzungen der Fassung führen. Allein der restauratorische Umgang mit verbräunten ölhaltigen Oberflächen bzw. Fassungen ist bis heute nicht hinreichend geklärt (Abb. 13).

Ein inhomogener weißer Belag auf der Fassung entölter Objekte ist an einigen Figuren und Holzbauteilen zu erkennen gewesen. Dieser Belag wurde zum einen als Gips identifiziert, welcher vermutlich durch Abmagerung des Öls im Oberflächenbereich sichtbar geworden ist. Zum anderen können bleiweißhaltige Schichten einen Belag bestehend aus Bleiseife erzeugen (Abb. 14).³⁵

³⁵ DBU-Projekt AZ 28606-45: Entwicklung und modellhafte Erprobung einer Technologie zur zerstörungsfreien Extraktion und Restaurierung von biozid und umweltgeschädigten Holzobjekten, Dipl.-Rest. Karsten Püschner, 2015, Prozessbegleitende Laboruntersuchungen, S. 22



Abb. 7: vor der Entölung, HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)



Abb: 8: nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)



Abb. 9: Sockelbereich nach der Entölung



Abb. 10: Sockelbereich nach der Entölung



Abb. 11: Makroaufnahme (5fach) offener Holzsubstanz nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen



Abb. 12: Makroaufnahme (5fach) offener Holzsubstanz nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen



Abb. 13: Makroaufnahme (5fach) Zustand der Fassung nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen



Abb. 14: Makroaufnahme (5fach) Zustand der Fassung nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen



Abb. 15: nach der Entölung, Johannes HI. Grab Dom Zwickau



Abb. 16: nach der Entölung mit Fehlstelle, defekte Holzstruktur unter der Oberfläche, Johannes HI. Grab Dom Zwickau

2.8 Bekannte Prozesse der Holzfestigung nach Entölung

Eine Studie zur Festigung biologisch geschwächten Nadelholzes ergab, dass einige Holzfestigungen mit natürlichen Bindemitteln Nachteile aufwiesen.³⁶ Tierische Leime zeigen beispielsweise nur mittelmäßige Festigungsergebnisse. In Anbetracht dessen, daß Leim spannungsreich aufdrocknet, hygroskopisch und mikrobiell anfällig ist, ergibt dies kein optimales Festigungsmittel.³⁷ Trocknende Öle rufen Sekundärschäden hervor.³⁸ Auch Wachse erweisen sich als problematisch, da die Möglichkeiten zur Weiterbearbeitung stark vermindert werden und nur ein geringer bis kein Festigungserfolg erzielt werden kann.³⁹

Gute Ergebnisse erzielt die Injektion von Kunstharzen. Durch das physikalische Auftrocknen, also Verdunsten des Lösemittels, werden die Probleme der chemischen Trocknung durch Sauerstoffmangel umgangen. Der Prozess des Verdunstens ist jedoch ein langwieriger Vorgang und kann durch die Verwendung gesundheitsschädlicher Lösemittel (z.B. PARALOID® B72, meist gelöst in Toluol) ebenfalls zu Problemen führen. Es gibt jedoch auch Kunstharze, die sich in ungiftigen Lösemitteln (z.B. Siedegrenzbenzin) lösen wie DEGALAN® P28 (früher: PLEXIGUM® P28). bei der Prüfung der Druckfestigkeit und des Eindringens sowohl bei Pilzholz als auch bei „Wurmholz“ wurden hiermit gute Ergebnisse erzielt.⁴⁰

Sobald jedoch ölgetränkte Kunstwerke gefestigt werden sollen, sind der Tränkung mit Kunstharzen Grenzen gesetzt. Fett und fette Öle werden den Polymeren in der Industrie als Weichmacher zugesetzt. Fetttröpfchen lagern sich in die Struktur der Kunststoffe ein und verhindern das Erhärten, wodurch länger-

³⁶ CUANY, F.; SCHAIBLE, V.; SCHIEBL, U.: Studien zur Festigung biologisch geschwächten Nadelholzes – Eindringvermögen, Stabilitätserhöhung, feuchtephysikalisches Verhalten. in: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Nr. 2, S. 249-292, 1989

³⁷ CUANY u.a., 1989, S. 275

³⁸ CUANY u.a., 1989, S. 270

³⁹ CUANY u.a., 1989, S. 276

⁴⁰ CUANY u.a., 1989, S. 274

fristige Flexibilität gewährleistet wird. Es ist zu erwarten, daß Öle in Figuren und anderen Bildwerken einen ähnlichen Effekt auf Kunstharze ausüben. Derzeit liegen noch keine Langzeitstudien vor, welche dieses Phänomen beweisen könnten. Kunstharze sind wie alle Tränk- und Injektionsmittel, trotz ihrer Löslichkeit nur schwer bis nicht reversibel.

Seit Ende des 20. Jahrhunderts sind in der Holzkonservierung Siliciumdioxid-Sole bekannt. Die Einlagerung des Nanosols in die Mikrostruktur des Holzes erhöht nachweislich dessen Härte bzw. Druckfestigkeit.⁴¹ Diese Metalloxid-Sole setzen die Brennbarkeit und die Wasseraufnahmefähigkeit stark herab, sodass die Hölzer beständiger gegenüber witterungsbedingten Einflüssen werden.⁴² Die Festigkeitserhöhung durch das Einbringen von Siliciumdioxid-Solen fällt eher gering aus, so daß der Einsatz bei stark degradierten Holzobjekten der Einsatz fraglich zu betrachten ist. Auch hier gibt es noch keine Erfahrungen hinsichtlich der chemischen Verträglichkeit mit Ölanteilen im Holz.

Eine Verwendung weniger als Festigungsmittel stellt das Calciumhydroxid-Sol dar, welches aus der Wandrestaurierung stammend zur Neutralisation des sauren Mediums im mit Ölanteilen versehenen degradierten Holz dienen kann.⁴³ Untersuchungen zur Konservierung des hölzernen Schiffswracks Vasa in Stockholm zeigten, dass der basische Charakter des Sols auch für die Neutralisierung saurer Verbindungen genutzt werden kann.⁴⁴ Verölte Hölzer können nicht mit dem Nanosol getränkt werden, da das ethanolische Dispergiermedium des Sols extrahierend auf die Verölung wirkt. Diese vom Probekörper abgewandt gerichtete Kraft stellt eine Gegenbewegung zum Eindringen des Sols dar. Das Calciumhydroxid gelangt nicht in das Innere des Holzes. Eine Vorbehandlung mit Ethanol konnte ein Teil des Öls aus dem Holz extrahieren, wodurch das Stocken/die Koagulation des Sols verlangsamt wird.⁴⁵ Die Bildung von Calciumcarboxylaten als neutrales Salz bewirkt nicht nur eine pH-Wert-Regulierung, sondern auch eine Festigkeitserhöhung. Trotzdem erscheint diese Methode nicht in allen Belangen, aufgrund des schwierigen Eindringverhaltens des Calciumhydroxid-Sols, geeignet zu sein. Zudem ist aufgrund der entstandenen neutralen Salze in Kombination von Klimaeinflüssen das Phänomen der Mazeration nicht auszuschließen.

Um geschädigte Kunstwerke, ob mit oder ohne Verölung, weiterhin zu erhalten, muß nach neuen Ansätzen gesucht werden, welche die Nachteile der bisherigen Methoden zu kompensieren versucht.

⁴¹ DBU-Projekt Az 08001: Einsatz von Metalloxid-Solen in der Holz- und Werkstoff-Industrie, Feinchemie GmbH Sebnitz, S. 13, 1997

⁴² NICKEL, E.: *SiO₂-Nanosole für die Holzkonservierung*, Facharbeit der Fachhochschule Köln im Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaften, S. 32, 2004

⁴³ RÖLLIG, S.: *Eignung von Calciumhydroxid-Nanosol zur Konservierung ölgetränkter Hölzer*, Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, Fachklasse für Konservierung und Restaurierung von Bildwerken und Raumausstattung, 2013

⁴⁴ GIORGI, R.; CHELAZZI, D.; BAGLIONI, P.: *Nanoparticles of Calcium Hydroxide for Wood Conservation. The Deacidification of the Vasa Warship*, Department of Chemistry an CSGI, University of Florence. in: Langmuir, Vol. 21, No. 23, S. 10743-10748, 2005

⁴⁵ Röllig, 2013, S. 47

3. Durchgeführte Arbeiten

3.1 Zustandsbeschreibung ausgewählter Objekte vor und nach einem Entölungsprozess

3.1.2 Bildgebende Verfahren

3.1.2.1 Lichtmikroskopie

3.1.2.1 Dünnschnittuntersuchung

Die Mikroskopischen Untersuchungen von Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom (Abb. 17) vor und nach der Entölung sollen zur Feststellung von Öl bzw. Restöl und dessen Verteilung dienen. Die Untersuchung fand an holzanatomisch intakten Bereichen statt.

Die Untersuchungen an den Proben (Abb. 18) erfolgten mit dem Auflichtmikroskop „SMZ 1500“ der Firma Nikon. Über die entsprechende Kopplung mit dem Bildverarbeitungssystem „NIS-Elements D3.2“ und der digitalen „Camera DS_Fi1c“ wurden Messungen durchgeführt und Fotos erstellt.⁴⁶

Weiterhin wurden Probenoberflächen in Vorbereitung der Untersuchungen glatt geschnitten und wenn möglich wurden von mehreren Bereichen Holzdünnсреitte in den 2 holzanatomischen Hauptschnittrichtungen (Querschnitt- Q, Tangentialschnitt-T) angefertigt.

Die Untersuchungen an den Glatt- oder Dünnschnitten wurden mit dem Auflicht-Fluoreszenzlichtmikroskop ECLIPSE E 800 bei 40- bis 600-fachen Vergrößerungen im Normal- und im UV-Fluoreszenzlicht untersucht. Festgestellt wurde jeweils vorhandenes Öl, die Ölverteilung und Schädigungen innerhalb der Holzsubstanz.

Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen gehen aus den Fotos sowie den Bildunterschriften hervor.

In den verölten Holzproben des HI. Grabes des Zwickauer Doms sind intensive Öleinlagerungen in den Fasern bzw. Faserlumen, den Holzstrahlzellen und häufig auch in den Gefäßen vorhanden. (Abb. 19/ 20)

Die entölten Holzproben zeigen die Gefäßlumen frei von Öleinlagerungen. In den Faserlumen und den Längsparenchymzellen sind nur noch vereinzelt Ölbestandteile vorhanden. (Abb. 21/ 22)

Die Entölung im Verfahren des Restaurierungsatelier Püschner zeigt somit eine Wirkung auf das eingebrachte Öl und führt zu einer Abreicherung.

⁴⁶ IHD Untersuchungsbericht 1218199, 11.09.2018



Abb. 17: Heiliges Grab, Dom Zwickau



Abb. 18: verölte (re.) und entölte (li.) Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom

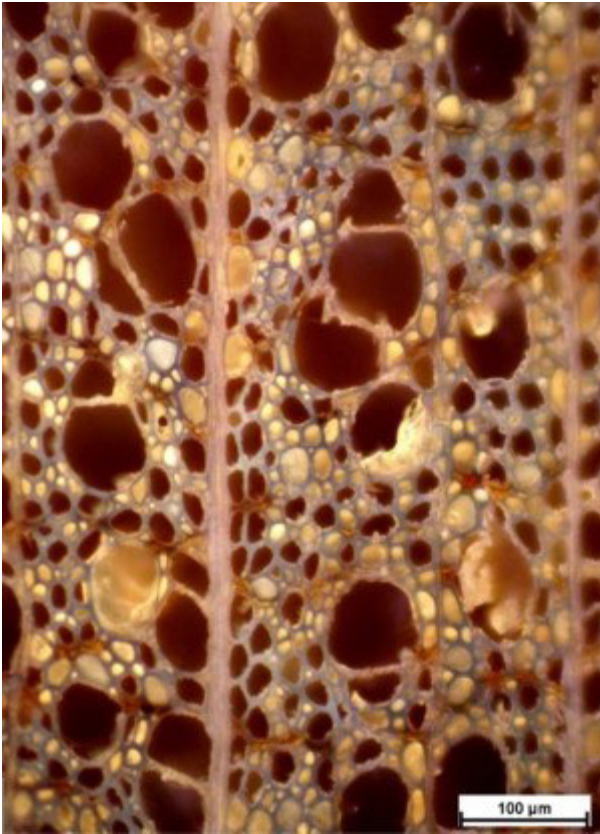


Abb. 19: verölte Holzprobe, Faserlumen und teilweise Gefäße mit Öl gefüllt, Querschnitt, UV-Licht (200fach)

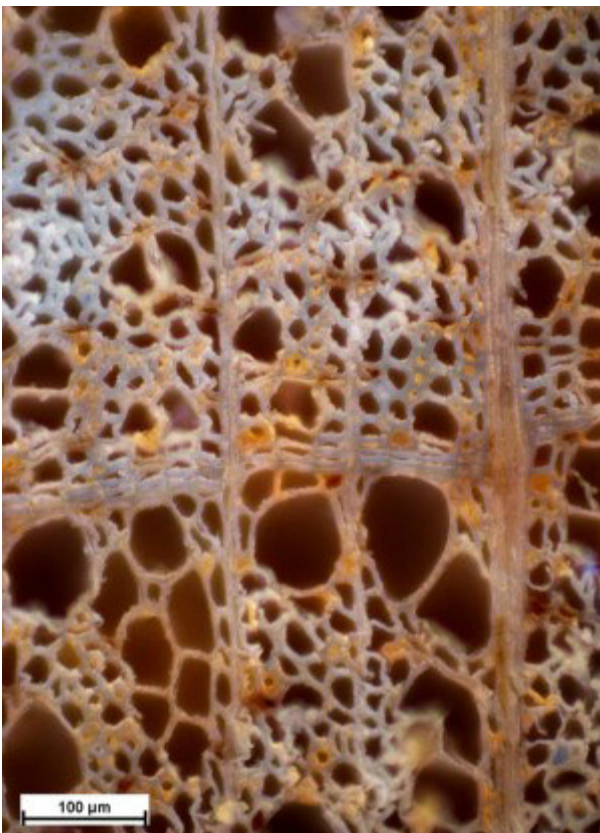


Abb. 20: entölte Holzprobe, nur noch vereinzelt Faserlumen mit Öl gefüllt, Querschnitt, UV-Licht (200fach)



Abb. 21: verölzte Holzprobe, Fasern, Holzstrahlen und teilweise Gefäße mit Öleinlagerungen Tangentialschnitt, UV-Licht (200fach)



Abb. 22: entölzte Holzprobe, vereinzelt in Fasern- und Längsparenchymzellen Ölbestandteile vorhanden, Tangentialschnitt, UV-Licht (200fach)

3.1.2.3 Querschliffuntersuchung

Zur Querschliffmikroskopie wurden zwei Figuren herangezogen, welche an ihrem jetzigen Standort, der Christophorus Kirche Böhlen, installiert sind. Hierbei handelt es sich um die Figuren des HI. Valentin und des HI. Michael (Abb.23/ 24), welche zusammen in einem Ensemble aus insgesamt 12 Figuren bestehen (Abb. 25).

Die beiden Figuren waren bis zu acht Jahre in der Entölungskammer des Restaurierungsateliers Püschner. Eine vergleichende Untersuchung des Zustandes vor der Entölung ist aufgrund fehlenden Probenmaterials nicht möglich.

Durch die Entölung stellt sich die Fassungsoberfläche in den meisten Partien topographisch verändert vor. Die Einwirkung des Lösemittels auf die Tempera gebundene Fassung und mögliche Öleinlagerungen haben die Fassung beeinflusst (Abb. 26). Zudem sind Ölreste an offenen Bruchstellen der Figur des HI. Michaels erkennbar (Abb. 27). Weitere Phänomene nach der Entnahme aus der Entölungskammer lassen sich am HI. Michael aufgrund des weiteren Abdunstens von noch vorhandenen Lösemittel aus der Figur feststellen. Die innere Struktur der Figur, welche vermutlich nur noch aus Holzmehl besteht, schwindet. Gleichzeitig besteht wahrscheinlich kein ausreichender Zusammenhalt der noch vorhandenen Holzmatrix, was zu Ausbrüchen an der Oberfläche bis statischen Schäden im Fußbereich führt. Eine mögliche Ursache stellt vermutlich auch die Abreicherung des Öls durch den Entölungsprozess bzw. eine veränderte Verteilung des Restöls dar. Das Öl bzw. Restöl fungierte mitunter als Festigungsmittel der noch vorhandenen Holzmatrix.

In den Fassungsquerschliffen der Figuren des HI. Valentins und des HI. Michaels lässt sich eine anatomisch intakte Holzmatrix nur noch in oberflächennahen Bereichen feststellen. Dies entspricht dem gängigen Frassmuster tierischer Holzschädlinge, welche die oberflächliche Holzstruktur belassen und diese nur im Inneren zerstören. Die starken Verdunklungen der äußersten Fassungsschichten deuten auf die Anreicherung von Ölanteilen während des Entölungsprozesses hin. Vermutlich findet nach dem Fassungshorizont kein Abtransport des schwerflüchtigen Öls in Verbindung mit dem Lösemittel statt. (Abb. 28 – 31)



Abb. 23: Heiligenfiguren der Christophorus Kirche Böhlen



Abb. 24: HI. Valentin



Abb. 25: HI. Michael



Abb. 26: Fassungsoberfläche nach Entölung, Makroaufnahme, HI. Michael



Abb. 27: Ausbruchfläche nach der Entölung, Holzmehl eingelagert in Ölresten, Makroaufnahme, HI. Michael



Abb. 28: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Valentin (VIS)

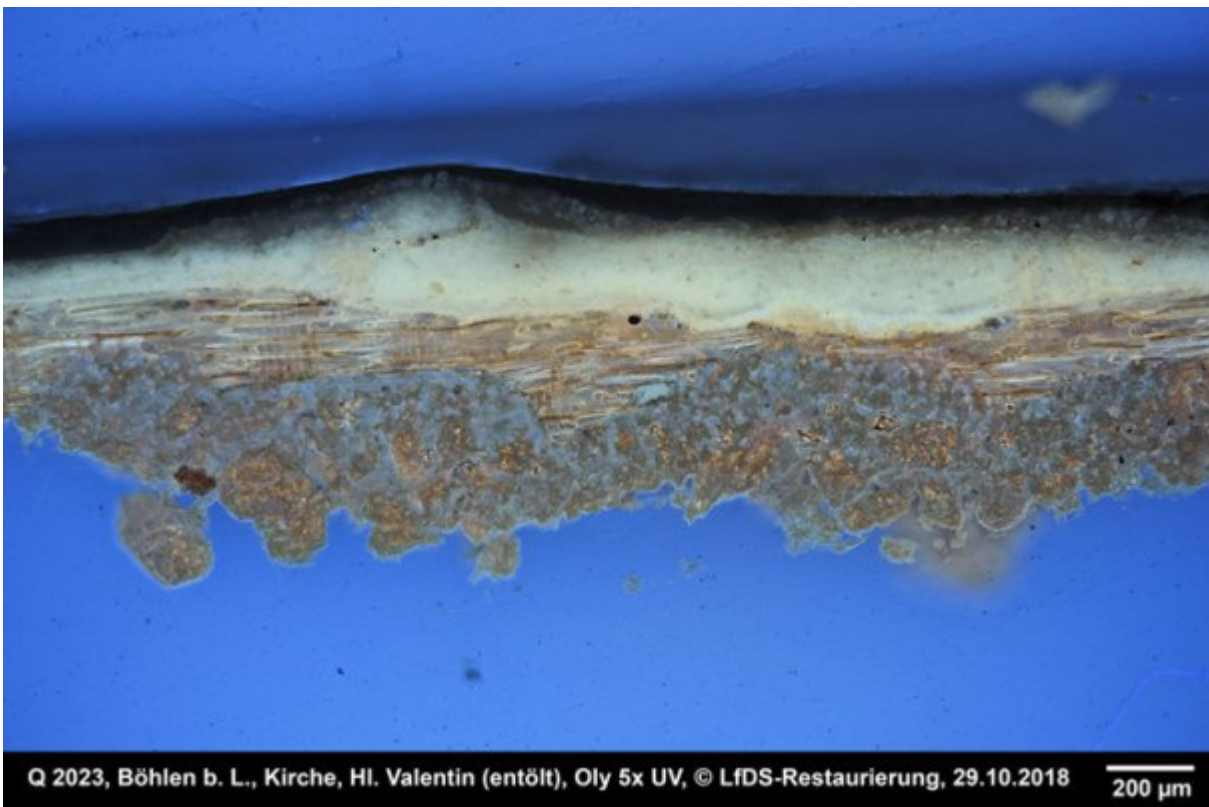


Abb. 29: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Valentin (UV)



Abb. 30: Querschliff, Holzträger mit veröltter Fassung nach der Entölung, HI. Michael (VIS)

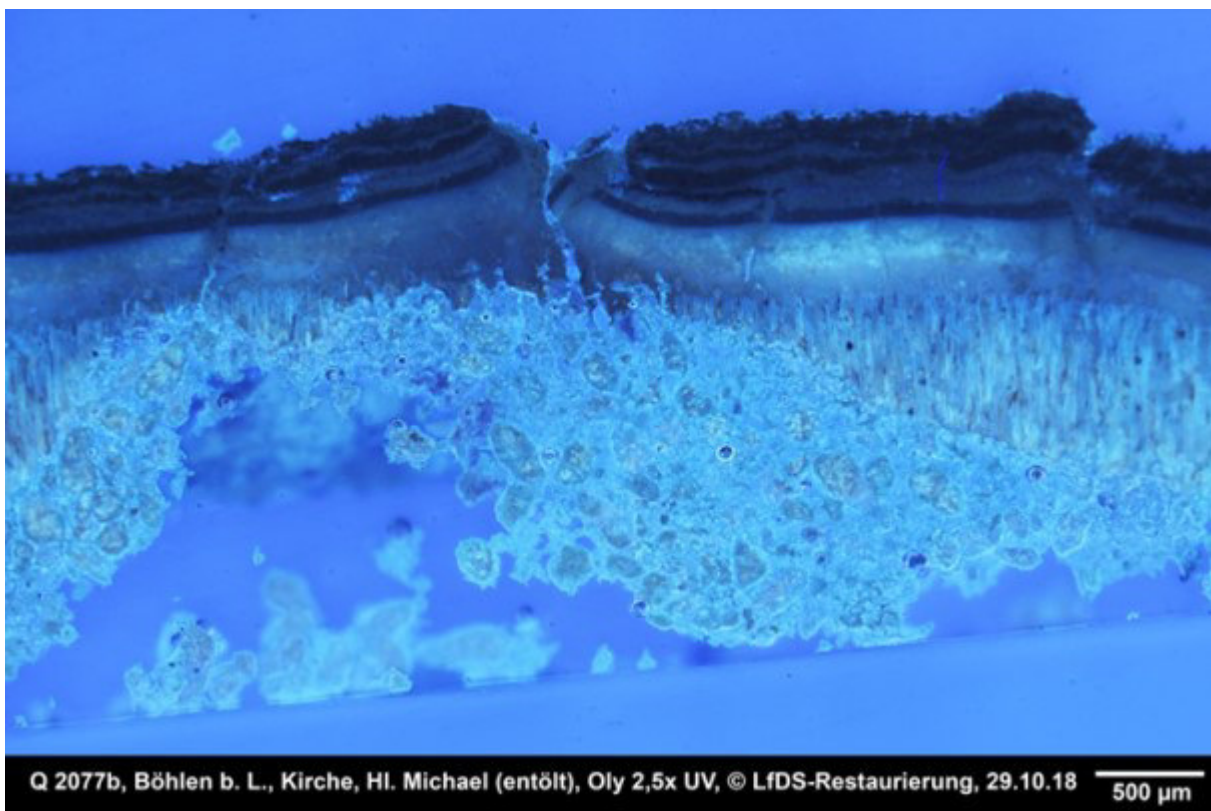


Abb. 31: Querschliff, Holzträger mit veröltter Fassung nach der Entölung, HI. Michael (UV)

3.1.2.4 Röntgen-Mikrocomputertomographie (Mikro-CT)

Bei der Röntgen-Computertomographie handelt es sich um bildgebendes Verfahren auf Basis von Röntgenstrahlung. Das zu untersuchende Objekt wird in einen Strahlengang bestehend aus Strahlerzeugung, Probenmanipulator und Detektor eingebracht und aus unterschiedlichen, definierten Richtungen durchleuchtet. Die so entstandenen, zweidimensionalen Aufnahmen werden anschließend mathematisch in ein dreidimensionales Modell des untersuchten Objektes zurück überführt.

Die Erzeugung der Röntgenstrahlung in der Röntgenröhre findet typischerweise durch Elektronen statt, die auf ein metallisches Objekt, das sog. Target bzw. Anode, fokussiert und beschleunigt werden. Das Material bestimmt zusammen mit der Beschleunigungsspannung die „Härte“ der Röntgenstrahlung, also die mittlere Energie der Photonen und damit deren Durchdringungsfähigkeit.

Bei Zeilendetektoren kann wiederum durch Kollimation an der Strahlenquelle sowie am Detektor Streustrahlung effektiv bekämpft werden, was das Signal/Rauschverhältnis positiv beeinflusst und die Notwendigkeit einer Integration über mehrere Einzelaufnahmen verringert. Zusammen mit einem schnellen Auslesen des Detektors durch die kleine Detektorfläche, sind sehr kontrastreiche Aufnahmen in wenigen Minuten möglich. Da die Höhe des Zeilendetektors aber nur einen oder sehr wenige Pixel beträgt, verlangt das Erstellen größerer Volumina mehrere Aufnahmen an unterschiedlichen Positionen entlang der z-Achse des Probekörpers. Um ein zu einem mittels Kegelstrahl-CT identischen Volumen zu erzeugen, wären daher mit einem Zeilendetektor sehr viele Einzel-Tomographien notwendig, die insgesamt deutlich zeitintensiver als eine Tomographie mit Kegelstrahl-Geometrie wäre.

Während der Tomographie wird normalerweise der Probekörper im Strahlengang um 360 Grad gedreht. Diese Rotation wird in eine diskrete und äquidistante Anzahl von Winkelschritten unterteilt (zum Beispiel 0.25°) und an jeder dieser Positionen wird eine Durchstrahlungsaufnahme angefertigt. Diese radiographischen Projektionen werden anschließend benutzt, um während der Rekonstruktion auf die lokalen Dichte- und Ordnungszahlunterschiede zurück zu schließen und ein dreidimensionales Modell des Probekörpers zu erzeugen.

Der Röntgen-Mikrocomputertomograph „nanotom 180NF“ wurde zur Untersuchung verwendet (Abb. 32/ 33). Das Scannen einer Probe dauerte ca. 30 min.

Die computertomographischen wurden am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU-Dresden durchgeführt. Es wurden Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom vor und nach der Entölung zur Feststellung von Öl bzw. Restöl und dessen Verteilung untersucht (Abb. 34).

Da die Dichte von Leinöl der Dichte der Festbestandteile von Holz sehr ähnlich ist (Tab. 3), sind die Kontrastunterschiede bei der bildlichen Darstellung kaum wahrzunehmen. Auch die hohe Auflösung der Mikro-CT erzeugt kein besseres Ergebnis. Die mögliche Verteilung der Restölbestandteile lässt sich mit Hilfe der Defektanalyse nur sehr subjektiv darlegen. Der Einsatz von diversen Hochpassfiltern kann durch die Anpassung der Filter je nach gewünschtem Effekt ein besseres Ergebnis entstehen lassen.

Leinöl bei 15 °C	Holz (reine Zellsubstanz)
0,93 g/cm ³	0,9 - 1,5 g/cm ³

Tab. 3: Rohdichte⁴⁷

Vergleichend sind im Folgenden verölte und entölte Probekörper in verschiedenen Schnittrichtungen dargestellt. In den Abbildungen 35 bis 40 ließ sich über die Defektanalyse der Dichteunterschied individuell einstellen und zeigt die mögliche Verteilung der Ölanteile im verölten Zustand und die Restölanteile im entölten Zustand.

⁴⁷ HEFTER, G.: Technologie der Fette und Öle, 3. Band, Heidelberg, 1921, S. 362-363

Röntgen-Mikrocomputertomograph:

nanotom 180NF

Röntgenröhre:

- 180 kV Mikrofocus (Transmission)
- Molybdän- oder Wolframtarget

Detektor:

- Flächendetektor (12 bit)
- 2304 x 2304 Pixel
- Pixel: 50 x 50 μm^2

Maximale Probenabmessungen:

- Durchmesser: 120 mm
- Höhe: 150 mm
- Masse: 2 kg

Detailerkennbarkeit: > 0,4 μm



Abb. 32: nanotom 180NF

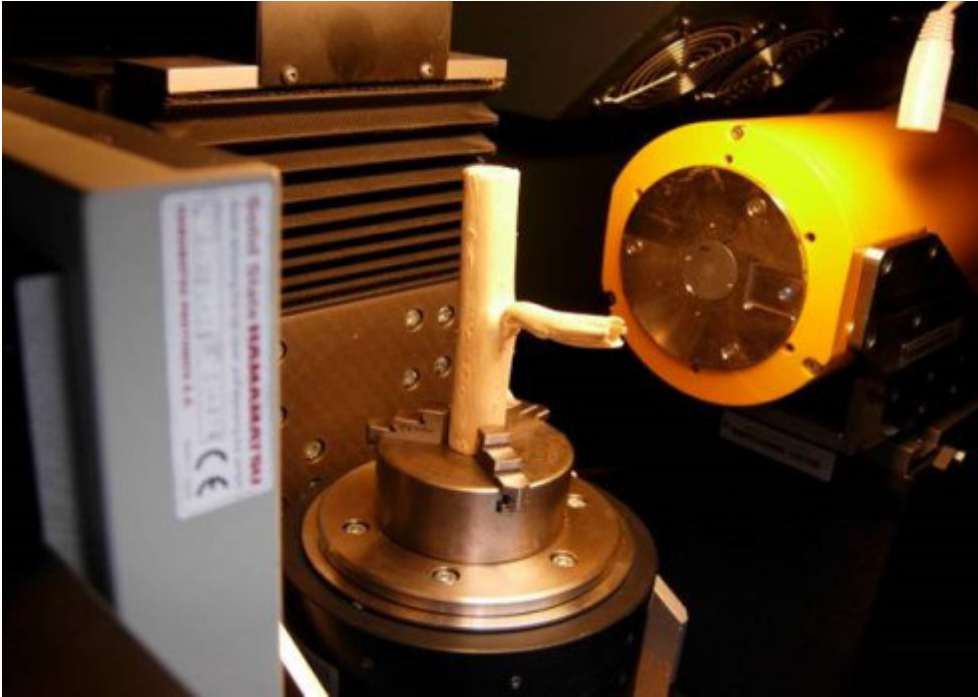


Abb. 33: nanotom 180NF, Probenraum



Abb. 34: verölte (re.) und entölte (li.) Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom

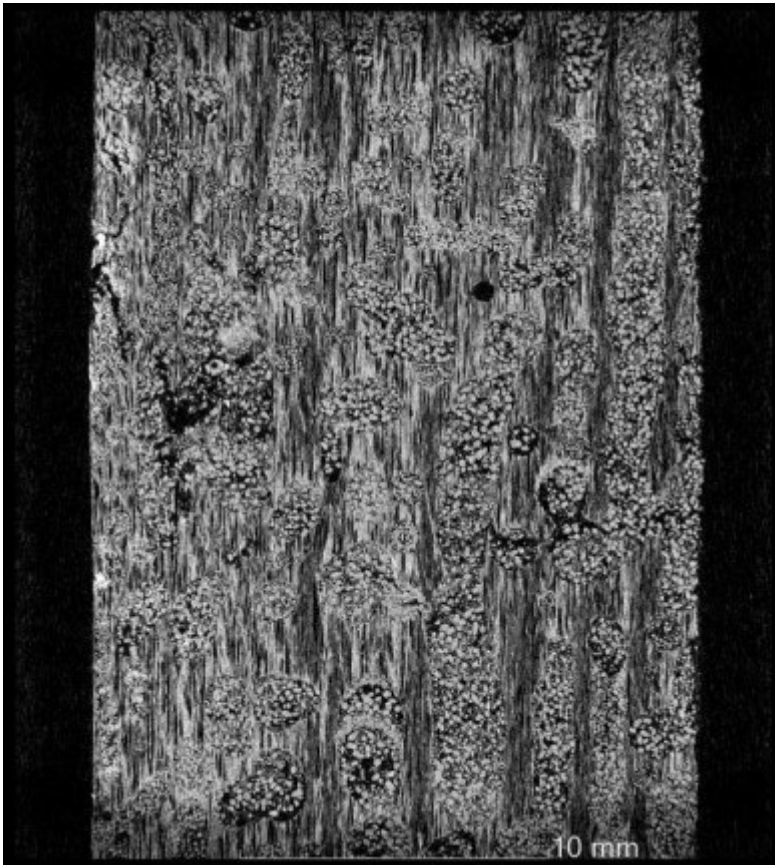


Abb. 35: verolte Lindenholzprobe, Längsschnitt



Abb. 36: verolte Lindenholzprobe, Längsschnitt, Defektanalyse

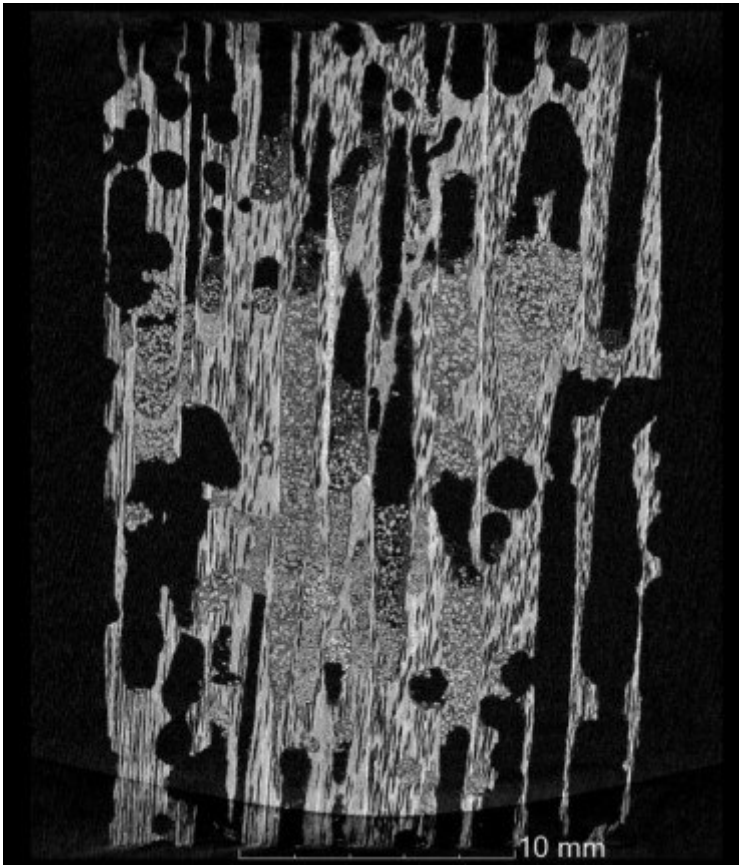


Abb. 37: entölte Lindenholzprobe, Längsschnitt

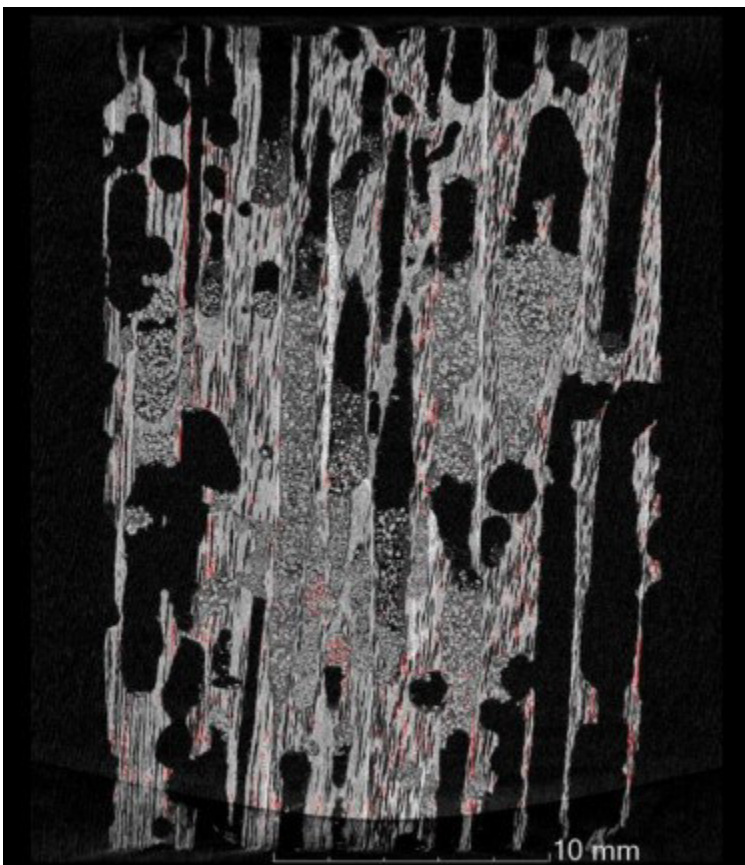


Abb. 38: entölte Lindenholzprobe, Längsschnitt, Defektanalyse

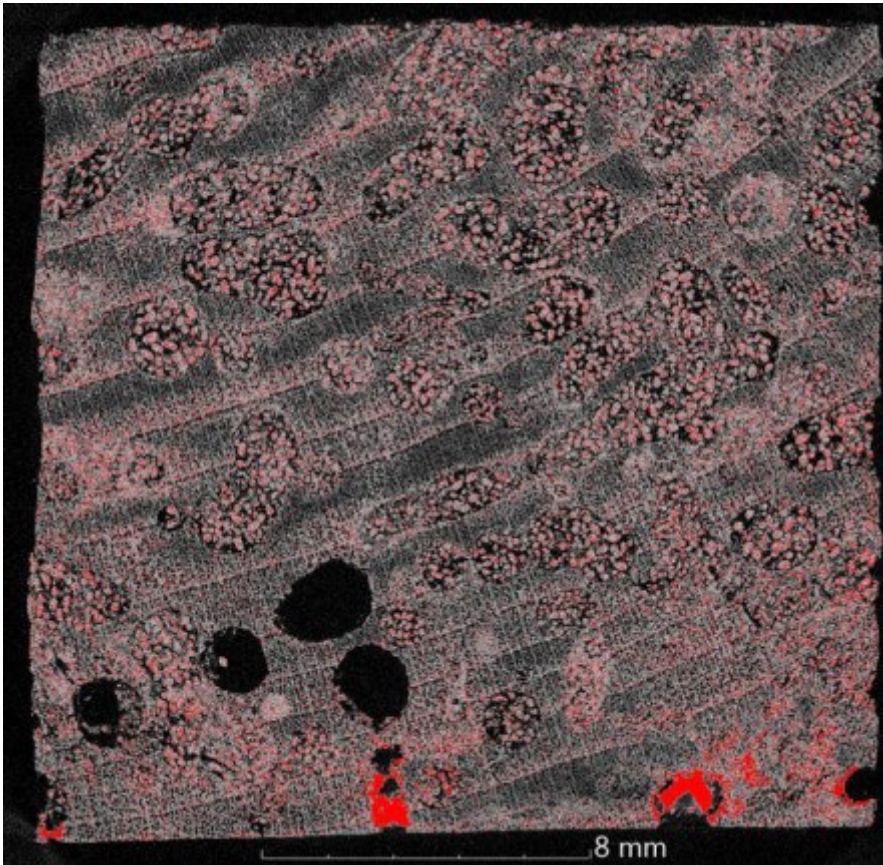


Abb. 39: verölte Lindenholzprobe, Querschnitt, Defektanalyse

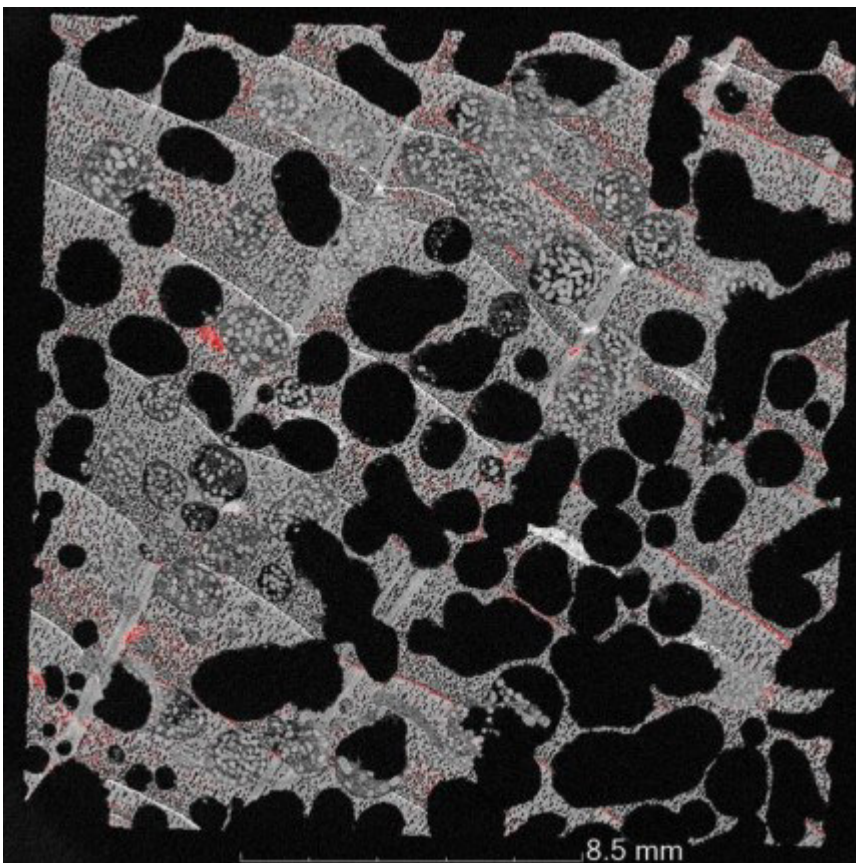


Abb. 40: entölte Lindenholzprobe, Querschnitt, Defektanalyse

3.1.2.5 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen fanden am Institut für Forstnutzung und Forsttechnik der TU-Dresden in Tharandt statt.

Bei dem Gerät handelt es sich um ein Rasterelektronenmikroskop mit Feldemissionsquelle der Firma FEI mit der Bezeichnung Quanta 650 FEG (Environmental FE-SEM). Dessen Besonderheit darin besteht, auch in einem Druckbereich bis 4000 Pa und bei bis zu 100 % Luftfeuchtigkeit zu arbeiten. Bei Ihren Proben haben wir im normalen Hochvakuummodus gearbeitet. In den Abbildungen ist erkenntlich, mit welchem Detektor die Aufnahmen angefertigt wurden. Es wurde sowohl ein SE-Detektor (für sekundär Elektronen) als auch ein DBS-Detektor (Directional Back-scattered, Rückstreuelektronen) verwendet.

Es wurden Holzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom vor und nach der Entölung zur Feststellung von Öl bzw. Restöl und dessen Verteilung untersucht (Abb. 41). Hierfür wurden die Proben gebrochen, um deren Oberfläche zu untersuchen.

Bei dieser Untersuchung stellte sich heraus, dass es sich bei der entölten Holzprobe nicht um Lindenholz handelt, sondern um Erlenholz. Dieser Fakt ist im Laufe des Projekts noch zu klären. Die Bestimmungsmerkmale der Erle zeigen ein zerstreutporiges Bild, radial ausgerichtete Gefäßgruppen sowie zusammengesetzte Holzstrahlen, welche im Bereich der zusammengesetzten Holzstrahlen 2-3 reihig sind und sonst einreihig. Weiterhin finden sich leiter-förmige Gefäßdurchbrechungen (10 – 20 Leisten). Im Gegensatz zeigt sich die Linde ebenfalls zerstreutporig mit radial ausgerichtete Gefäßgruppen und einfachen Gefäßdurchbrechungen. Die Holzstrahlen sind wiederum 3-4 reihig. Sehr deutlich zeigen sich schraubige Verdickungen entgegen der Erle.⁴⁸

In der verölten Lindenholzprobe zeigen sich die Zellwände nach dem Bruch zur Probenvorbereitung gefüllt mit Öl (Abb. 42/ 43). Die Gefäße sowie die weiteren Porenräume sind dem entgegen nicht mit Öl gefüllt. Einzig Anhaftungen an den Zellwänden lassen sich erkennen (Abb. 28). Das Frassmehl in den Frassgängen, soweit dieses nach der Probenaufbereitung noch vorhanden ist, zeigt eine homogene Masse, welche durch Ölanteile zusammengehalten wird (Abb. 44 /45). Zudem befindet sich ein Öltropfen, der aus der Oberfläche der Probe austritt in Abb. 46. Bei großer Vergrößerung lässt sich das Öl in Verbindung mit dem Frassmehl deutlich erkennen (Abb. 47).

Die entölte Erlenholzprobe zeigt andere Strukturen der Zellwand als die verölte Lindenholzprobe (Abb. 48/ 49). Eine Abreicherung des Öls durch den Entölungsprozess scheint erfolgt zu haben. Eine Anhaftung des Öls an den Zellwänden lässt sich teils nur noch erahnen (Abb. 50). Im Längsschnitt der Erlenholzprobe stellen sich kreisrunde Kugeln dar. Es ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Öltropfen und nicht um Pilzsporen handelt, welche sich durch den Entölungsprozess gebildet haben und physikalisch nicht abtransportiert wurden (Abb. 51 – 53). Das Restöl liegt in diesem Fall nicht als homogene Struktur vor, sondern als Ansammlung einiger Tropfen.

⁴⁸ SCHWEINGRUBER, F.H.: *Mikroskopische Holzanatomie*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 3. Aufl., Birmensdorf, 1990



Abb. 41: verölte (re.) und entölte (li.) Holzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom

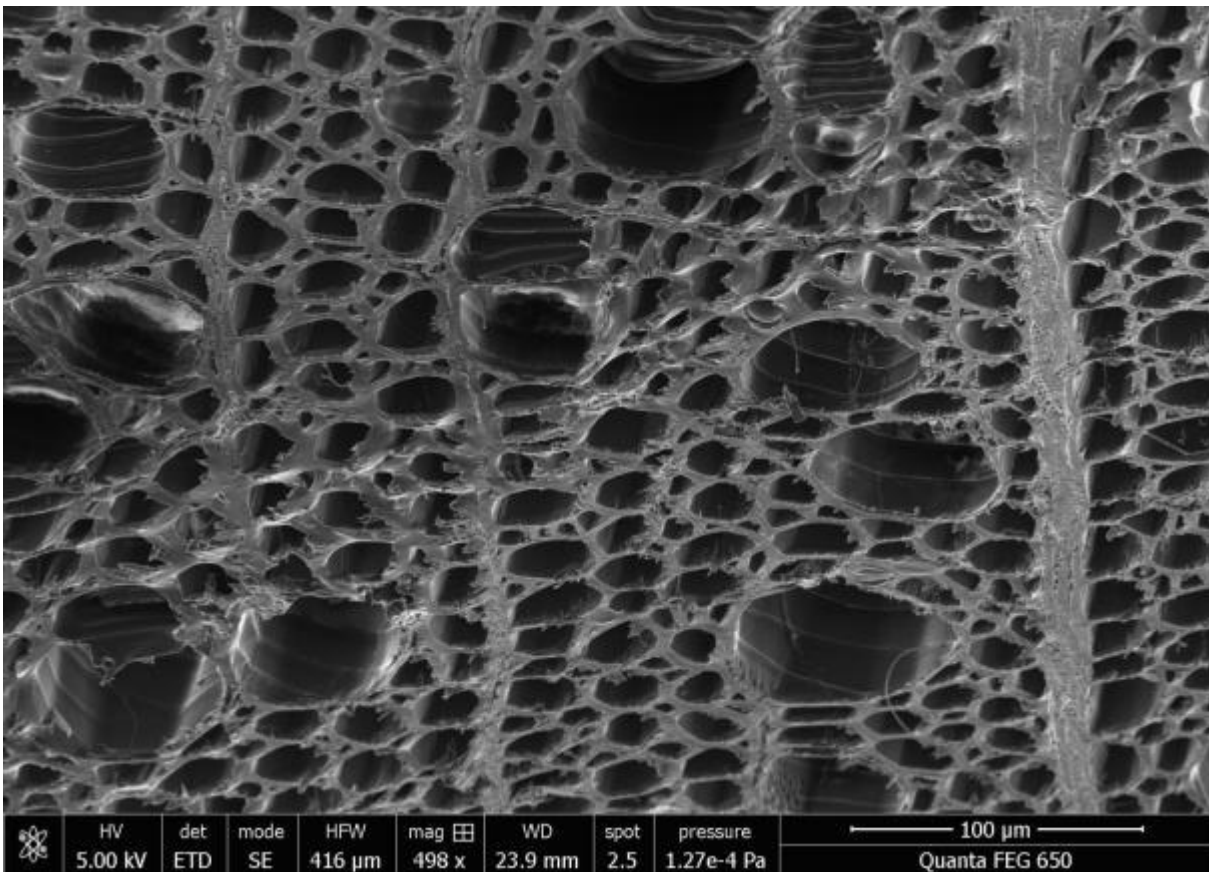


Abb. 42: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt

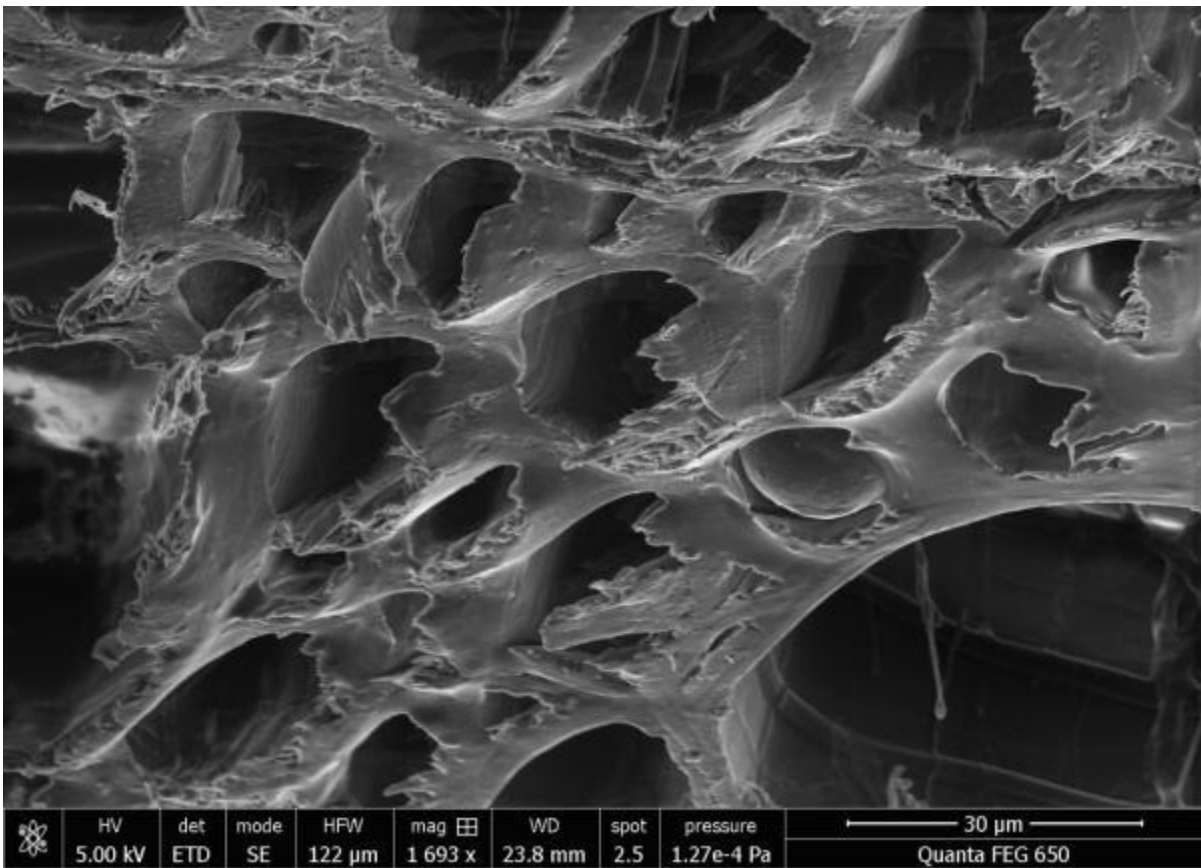


Abb. 43: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt

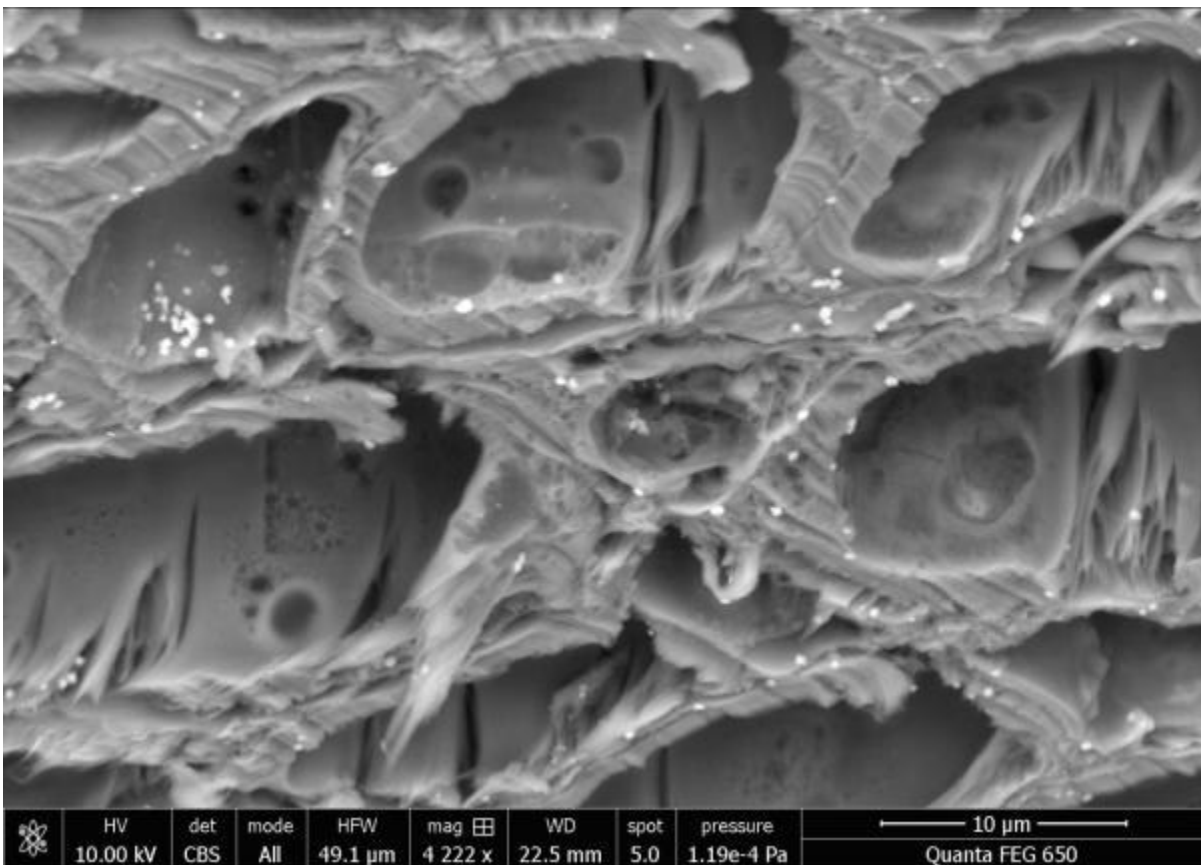


Abb. 44: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt

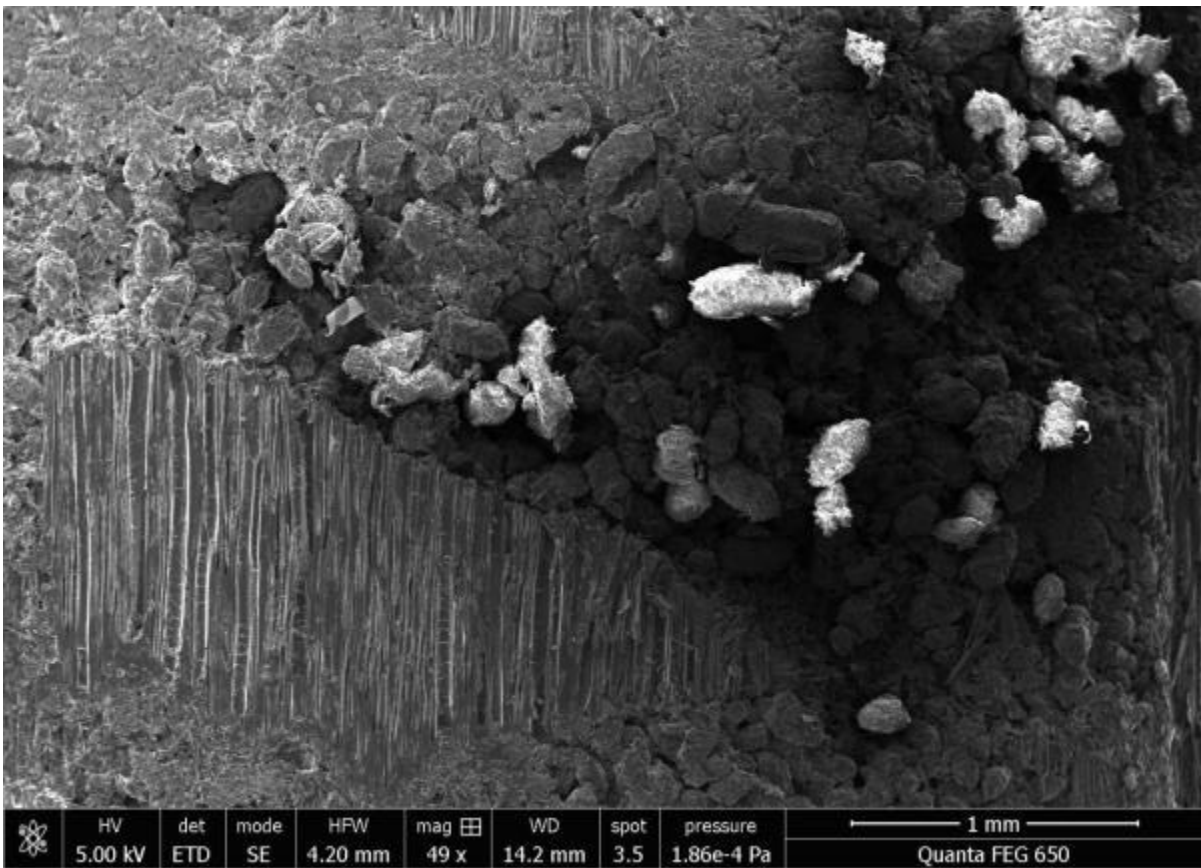


Abb. 45: verölte Linde, Fraßgang, in Öl gebundenes Fraßmehl

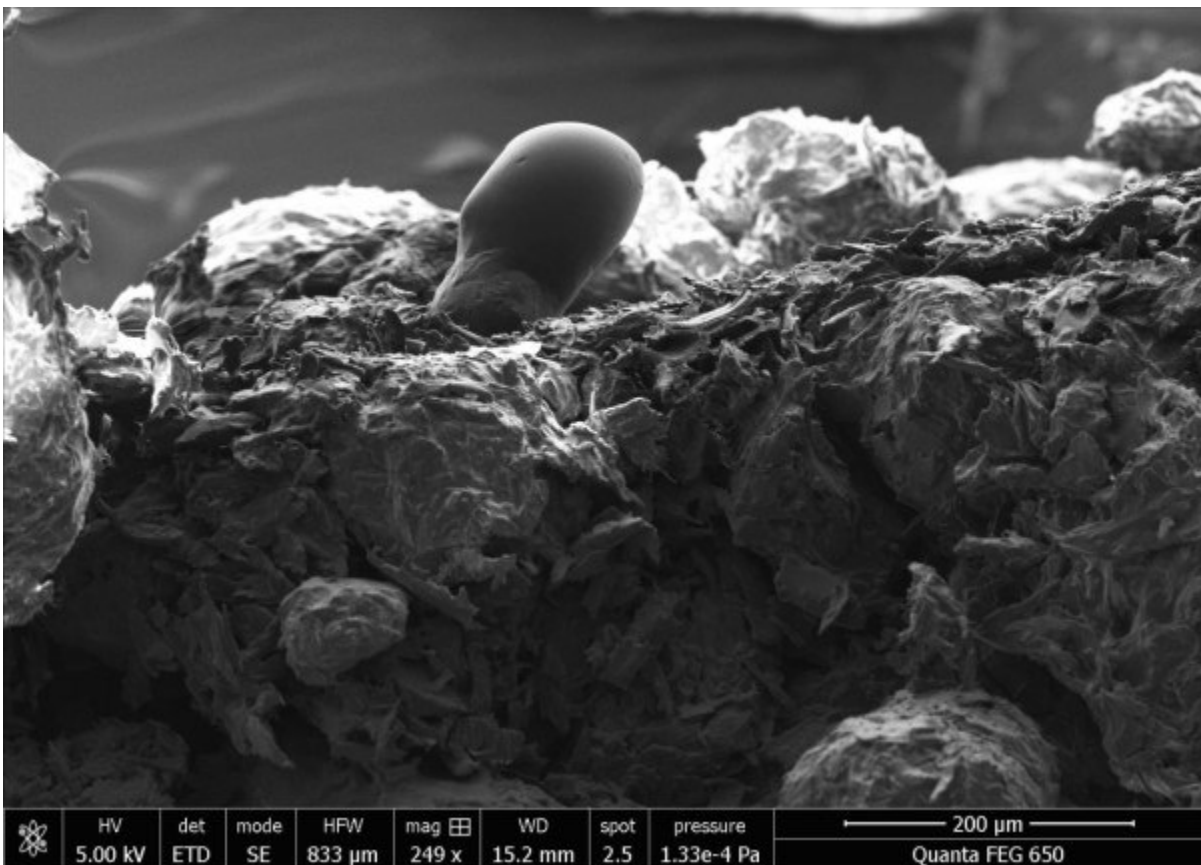


Abb. 46: verölte Linde, in Öl gebundenes Fraßmehl

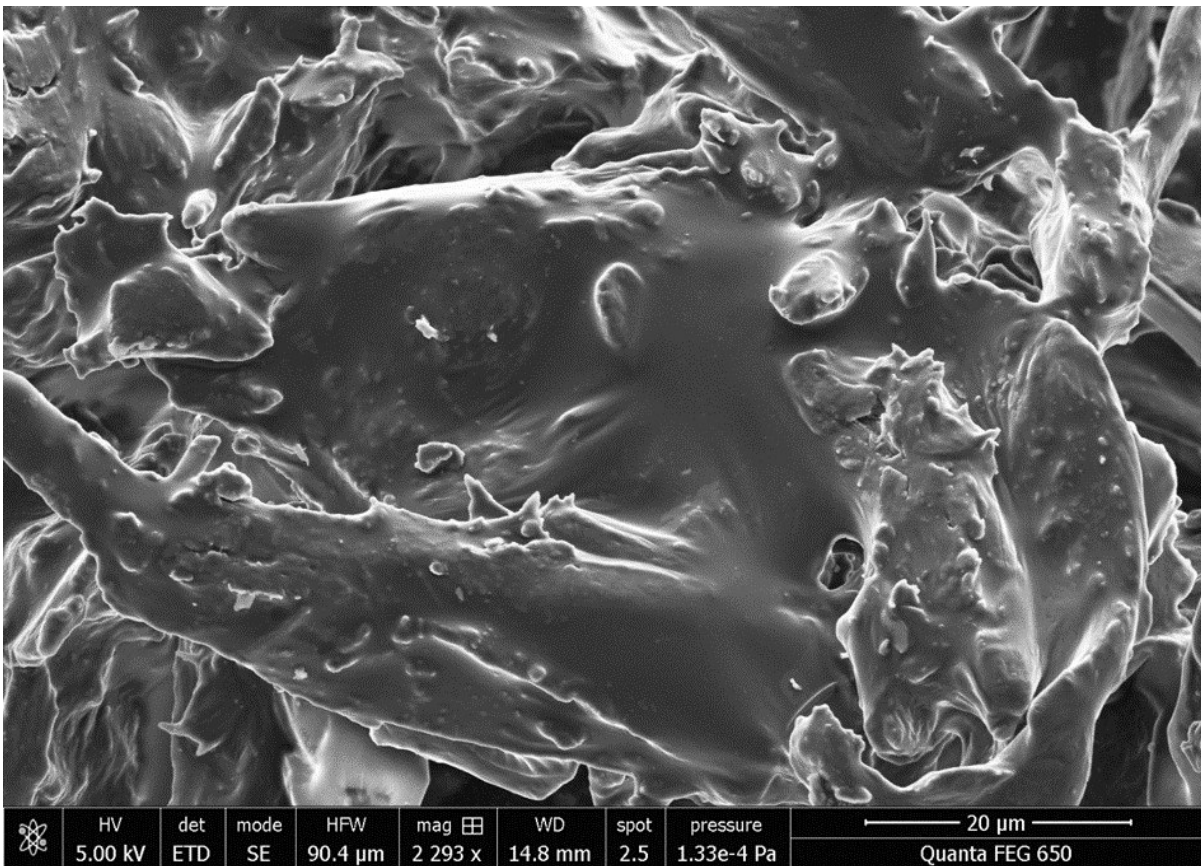


Abb. 47: verholzte Linde, in Öl gebundenes Fraßmehl

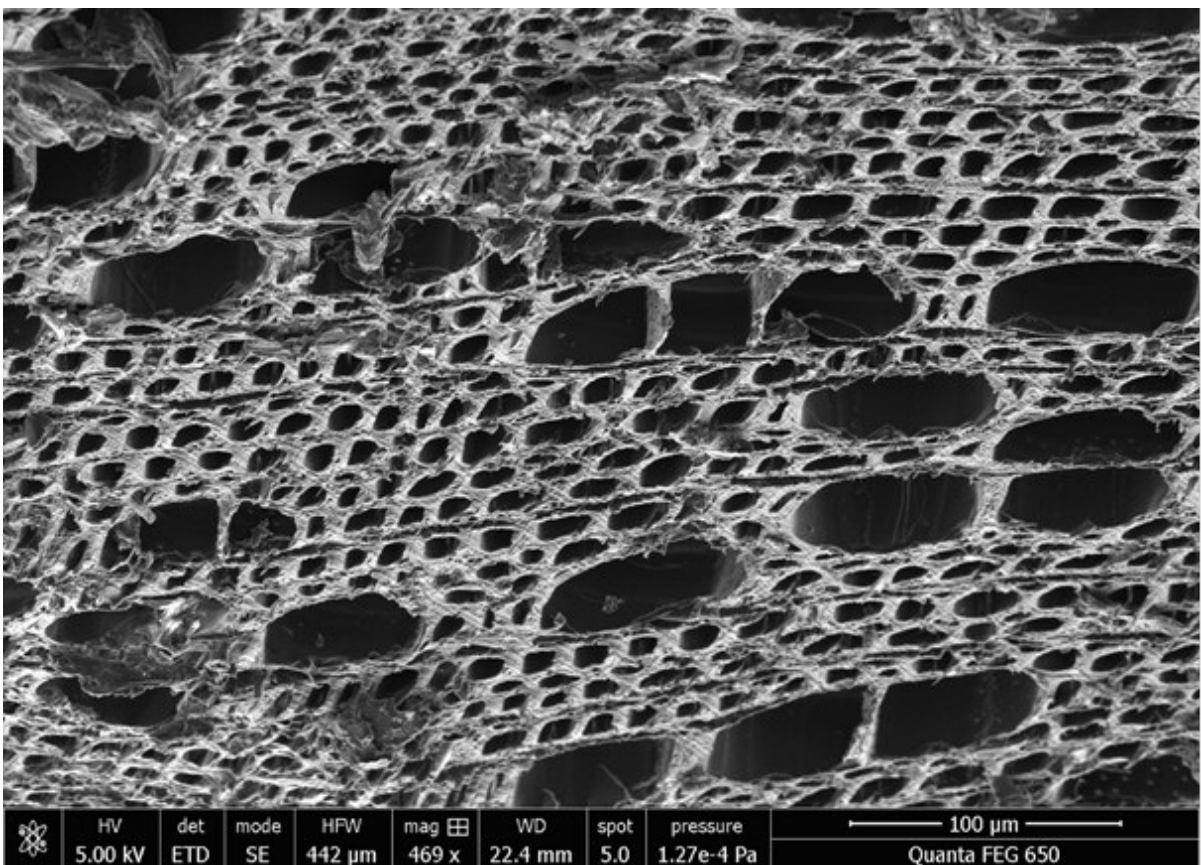


Abb. 48: entölte Erle, Querschnitt

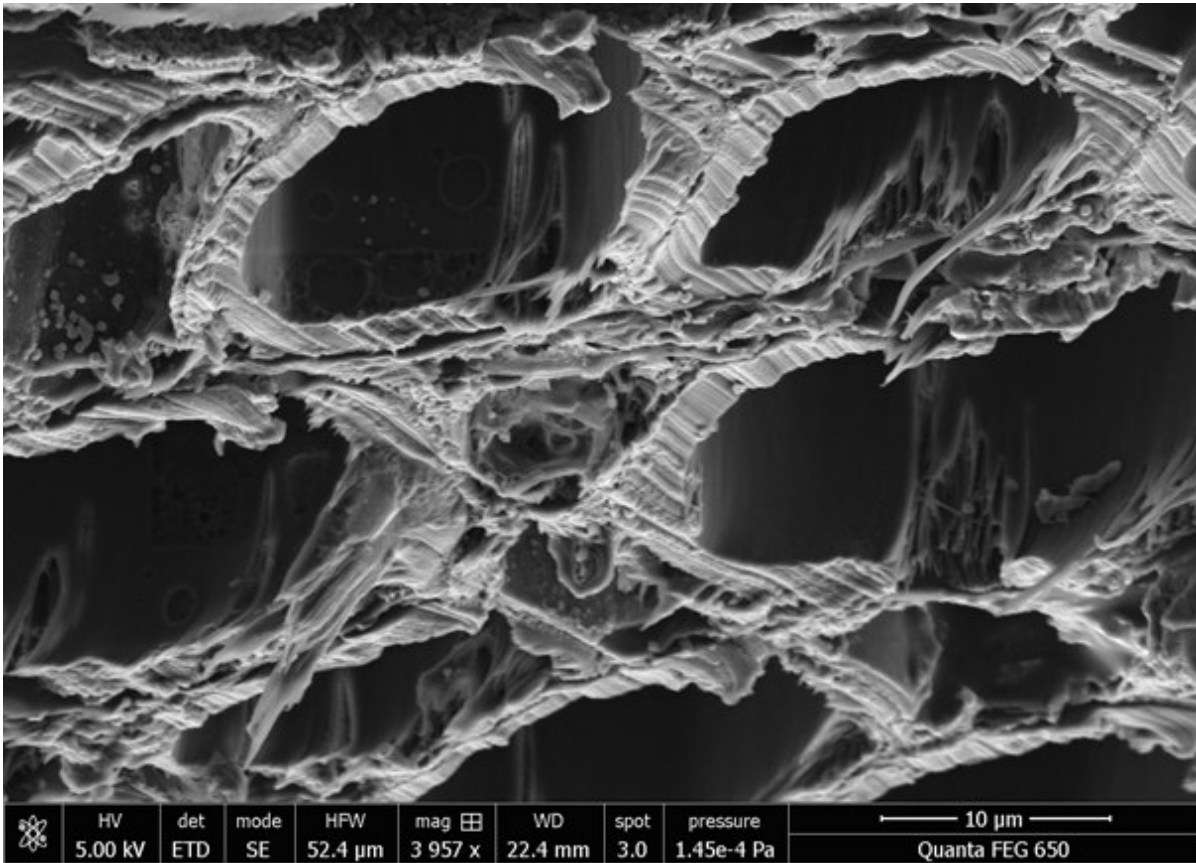


Abb. 49: entölte Erle, Querschnitt

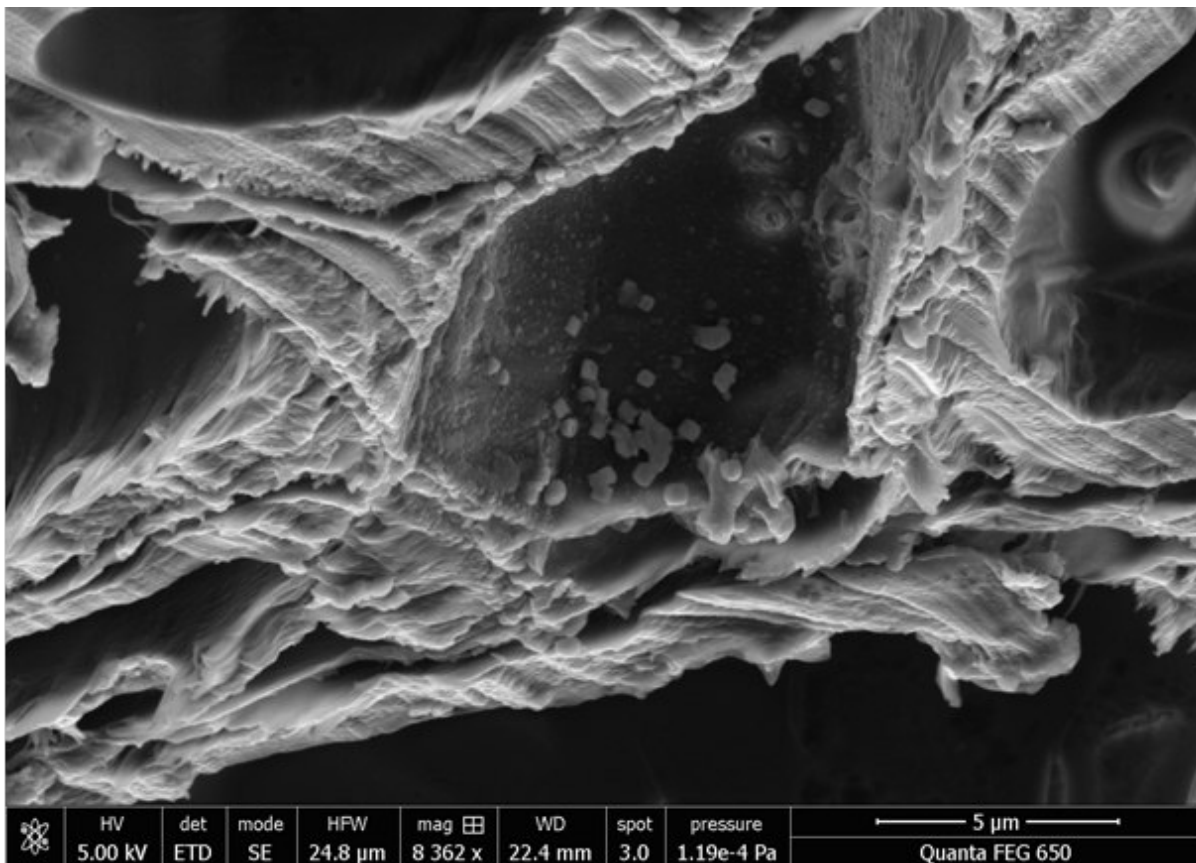


Abb. 50: entölte Erle, Querschnitt

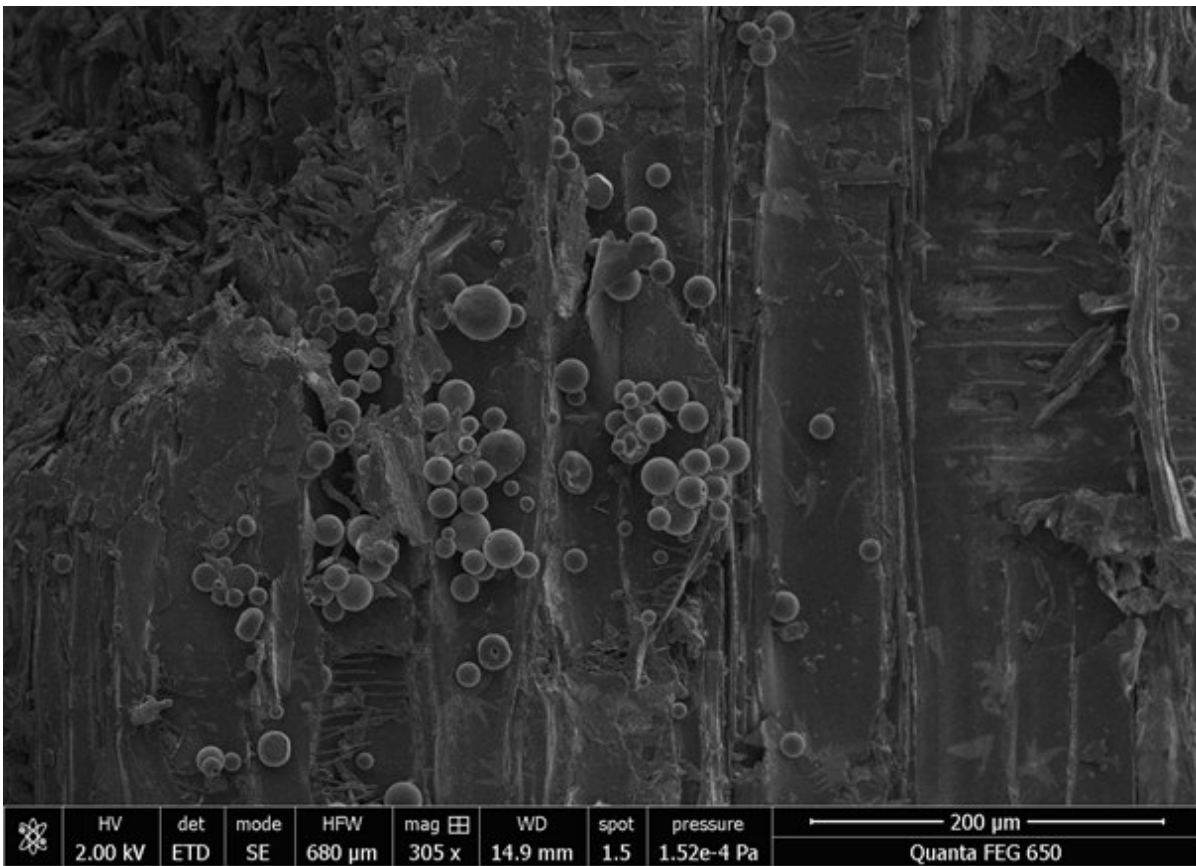


Abb. 51: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt

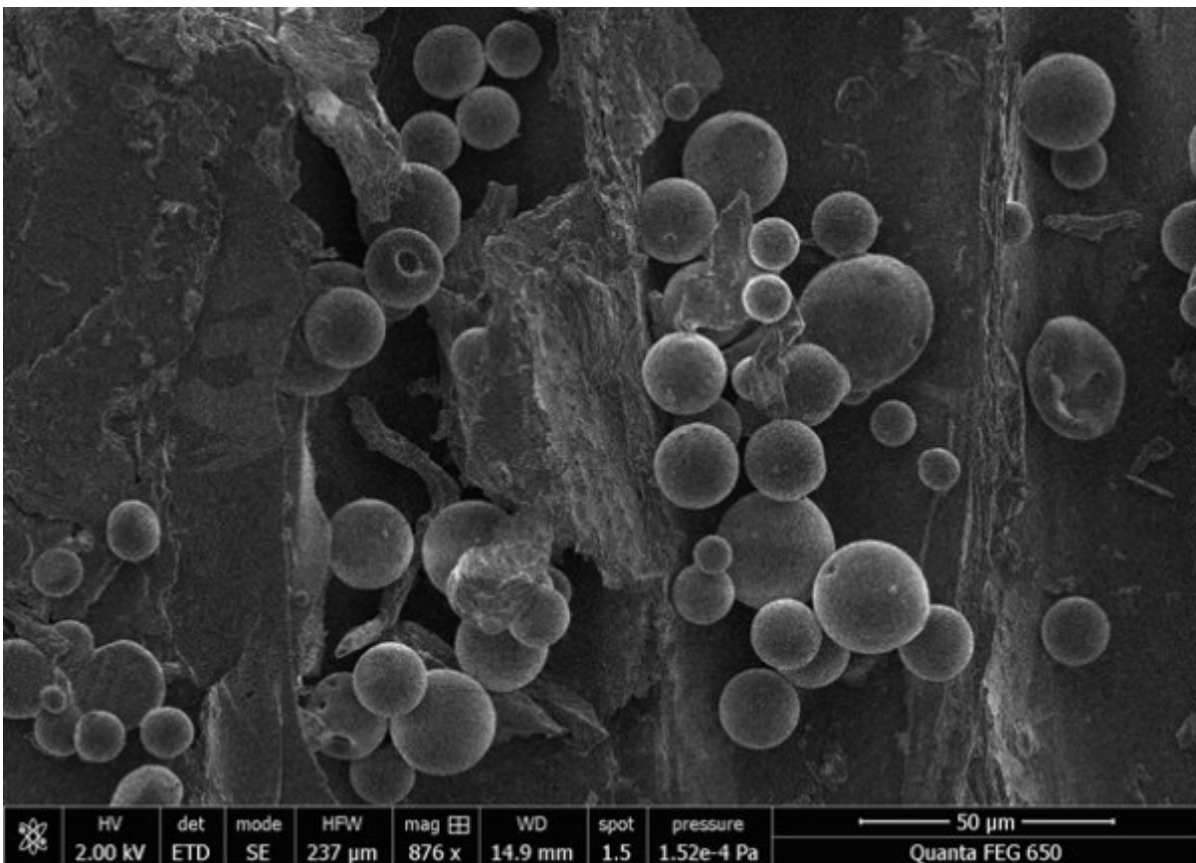


Abb. 52: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt

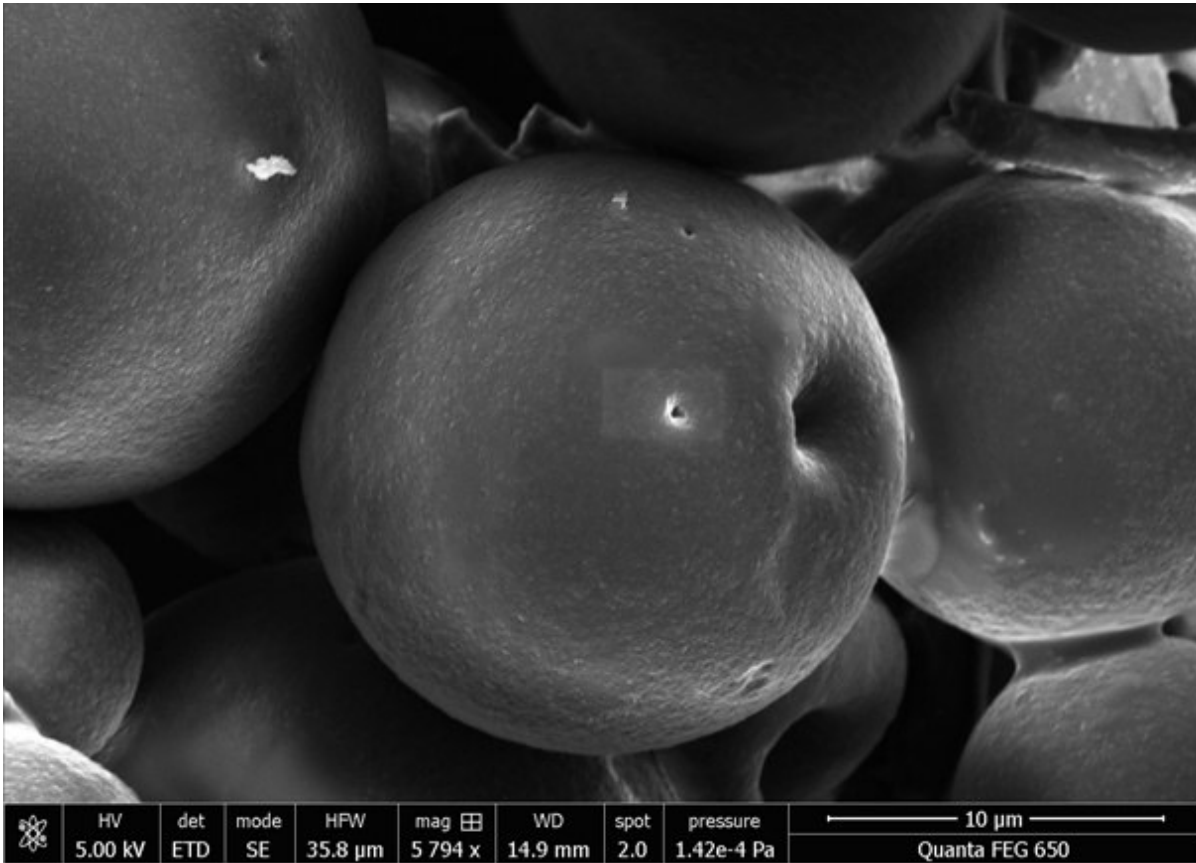


Abb. 53: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt

3.2 Chemische Analysen verölter Objekte und deren Extrakte

Zur Feststellung der Zusammensetzung realer, mit Leinöl gefestigter Proben wurden diesen Bohrkern, Späne und stückige Materialien entnommen. Dies geschah teilweise vor und nach der Entölung. Weiterhin wurden Ölextrakte unterschiedlicher Objekte untersucht.

3.2.1 Untersuchungsmaterial

Nr.	Probenbezeichnung	Beschreibung	Menge [g]
P0	Nicht entölte Probe Heiliges Grab Zwickau	Stück 30x21x7 mm	3,35 g
P1	Engel Görlitz, Brust	Bohrkern vor der Entölung 12/2018	0,16
P2	Engel Görlitz, Fuß	Bohrkern vor der Entölung 12/2018	0,09
P3	Engel Görlitz, Rest	Bohrkern vor der Entölung 12/2018	0,13
P4	Heiliger Valentin (Böhlen), Querschliiff	Entölt, teilweise gefasst, zwei Querschliffr, Fassung nach 8 Jahren in der Entölung	0,41
P5/1	Heiliger Valentin (Böhlen), Bohrkern	Bohrkern innen vor weiterer Entölung	0,96
P5/2	Heiliger Valentin (Böhlen), Querschliiff mit Fassung	Querschliiff mit Fassung außen, vor weiterer Entölung	0,15
P6	Heiliges Grab, Zwickau, Führungsbrett	Schabeprobe, nicht entölt	43,15
P7	Ebersdorfer Altar, Teile vom Gespränge	Schabeprobe, entölt, holzsichtig (Aufsatz von Anja Schönemann, enthält kein Puckolin)	51,73
P8/1	Heiliger Johannes, Heiliges Grab, Zwickau, Figur, Rand	Bohrkern, Rand der Figur, nach 2 Jahren Entölung	0,15
P8/2	Heiliger Johannes, Heiliges Grab, Zwickau, Figur, Mitte	Bohrkern, Mitte der Figur, ca. 4 cm	0,25
P8/3	Heiliger Johannes, Heiliges Grab, Zwickau, Figur, Ende	Bohrkern, Ende der Figur, innen	0,22
P8/4	Heiliger Johannes, Heiliges Grab, Zwickau, Figur,	Schabeprobe, Oberfläche	0,36
P9	Heiliges Grab, Nr. 77	Randprobe Brett	111,26
P10/1	PK 3a, Linde, 29,21 g	Modellprüfkörper Püschner	29,21g
P10/2	PK 3b, Kiefer, 33,89g	Modellprüfkörper Püschner	33,89g
P10/3	PK 3a, Tanne, 26,07gg	Modellprüfkörper Püschner	26,07g
P10/4	PK 3b, Balsa, 9,99g	Modellprüfkörper Püschner	9,99g
P11	Extrakt kleiner Kessel	Ausgetretenes Öl nach Entölungsprozess, Heuflauer Schmerzensmutter	n.b.
P12	Extrakt Großer Kessel	Ausgetretenes Öl nach Entölungsprozess, Mischung	n.b.
P13	Extrakt Valentin Böhlen	Ausgetretenes Öl 0,5 Jahr nach 8 Jahren Entölung gesammelt.	n.b.
P14	Extrakt heiliger Johannes, Heiliges Grab Zwickau	Ausgetretenes Öl 0,5 Jahr nach 2 Jahren Entölung gesammelt.	n.b.

Tab. 4: Probenmaterial

In den folgenden Abbildungen sind ausgesuchte Objekte und die entsprechende Probeentnahme dargestellt.



Abb. 54: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Extrakt nach 0,5 Jahren (P8/1-4)



Abb. 55: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Bohrkernprobe



Abb. 56: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Extrakt nach 0,5 Jahren (P8/3)



Abb. 57: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz (P1-P3)



Abb. 58: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)



Abb. 59: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)



Abb. 60: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)



Abb. 61: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen (P4-P5)



Abb. 62: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen, Bohrkernentnahme (P5/1-2)



Abb. 63: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen, Bohrkernprobe (P5/1-2)

3.2.2 Untersuchungsmethoden

3.2.2.1 Gaschromatographische Bestimmung von Fettsäuren

Die gaschromatographische Bestimmung der Fettsäurezusammensetzung erfolgt in Anlehnung an DIN 55957 (E) vom Oktober 1998 nach Abschnitt 4.3 – Bortrifluorid-Verfahren.

Es werden ca. 2 bis 3 g an Holzspänen mit 40 ml 0,5 m methanolischer Natriumhydroxidlösung versetzt und 2 Stunden im Ultraschallbad behandelt. Danach werden von der Lösung 10 ml abgenommen, ca. 1 min unter Rückfluss gekocht und 5 ml 14 %-ige Bortrifluoridlösung zur Veresterung zugegeben. Die Extraktion der veresterten Fettsäuren erfolgt mit 25 ml Heptan.

Kalibriert wird mit dem Fettsäure-Mix „FAME Mix C8-C24; CRM18918“ von Supelco

3.2.2.2 Gaschromatographische Bestimmung von VOC und SVOC in Anlehnung an DI ISO 11890 – 2

Zur Bestimmung der flüchtigen Komponenten bis zum Siedepunkt von 250 °C mittels Gaschromatographie wird ca. 1 g Probe in 5 ml Methanol gelöst, mit 10 µl Tetradecan als internem Standard versetzt und anschließend 30 Minuten lang geschüttelt.

Die qualitative Identifizierung der Einzelkomponenten erfolgt mittels GC-MS. Unbekannt gebliebene Verbindungen werden mit Hilfe des internen Standards quantifiziert.

Die Quantifizierung der enthaltenen VOC erfolgt im Anschluss mittels GC/FID.

Als VOC gelten alle Peaks, die bis zur Retentionszeit von Tetradecan (Siedepunkt 253°C) integrierbar sind, als SVOC werden alle Peaks bis zur Retentionszeit von Docosan (Siedepunkt 369°C) zusammengefasst.

Es wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt.

Nachweisgrenze VOC und SVOC: 20 mg/kg (entspricht 0,002 m%)

3.2.3 Ergebnisse

3.2.3.1 Gehalte an Fettsäuren

	Engel Görlitz BK Brust vor Entölung	Engel Görlitz BK Fuß vor Entölung	Engel Görlitz BK Rest vor Entölung	Valentin Spanabfall von Bohrkern 8J entölt	Valentin BK innen 8J entöl	Valentin QS außen 8J entöl	HG Zwickau Brett nicht entölt	Ebersdorfer Altar Gespränge entölt
Fettsäure, gesättigt	P1	P2	P3	P4	P5/1	P5/2	P6	P7
Octansäure (8:0)	337	202	517	229	17	174	244	646
Decansäure (10:0)	1214	133	159	39	5,5	0	63	89
Laurinsäure (12:0)	750	800	992	0	0	0	91	88
Tetradecansäure (14:0)	478	594	618	82	10	66	209	184
Palmetinsäure (16:0)	13423	17560	17148	9493	471	4421	21040	12186
Stearinsäure (18:0)	11998	14408	14167	7094	265	2466	2473	5001
Arachidinsäure (20:0)	506	627	610	341	14	148	718	643
Behensäure (22:0)	403	474	509	288	14	128	657	439
Lignocerinsäure (24:0)	286	429	368	204	12	62	347	38451
Summe [mg/kg]	29395	35227	35088	17770	809	7465	25842	57727
Summe [g/kg]	29,4	35,2	35,1	17,8	0,8	7,5	25,8	57,7

Tab. 5: Gehalt an Fettsäuren im Probenmaterial

	Johannes BK Rand 2 J entölt	Johannes BK Mitte 2J entölt	Johannes BK Ende, innen 2J entölt	Johannes QS Oberfläche 2J entölt	HG Zwickau Randprobe Brett	Modell PK Püschner 3a Linde	Modell PK Püschner 3b Kiefer	Modell PK Püschner 3a Tanne	Modell PK Püschner 3b Balsa
Fettsäure, gesättigt	P8/1	P8/2	P8/3	P8/4	P9	P10/1	P10/2	P10/3	P10/4
Octansäure (8:0)	1074	937	654	480	4298	555	721	161	396
Decansäure (10:0)	213	200	190	138	51	33	39	26	86
Laurinsäure (12:0)	1422	1381	1339	1132	54	16	96	16	29
Tetradecansäure (14:0)	691	674	706	616	204	79	103	86	195
Palmetinsäure (16:0)	18010	17767	19705	16936	18830	5008	6982	5820	17464
Stearinsäure (18:0)	14328	14039	14852	13521	4298	3235	3363	3991	12438
Arachidinsäure (20:0)	598	604	622	555	668	154	219	179	479
Behensäure (22:0)	539	504	572	405	638	162	198	160	425
Lignocerinsäure (24:0)	1168	166	352	320	344	1007	76	112	298
Summe [mg/kg]	38043	36272	38992	34103	29385	10249	11797	10551	31810
Summe [g/kg]	38,0	36,3	39,0	34,1	29,4	10,2	11,8	10,6	31,8

Tab. 6: Gehalt an gesättigten Fettsäuren im Probenmaterial

	Extrakt kleiner Kessel	Extrakt großer Kessel	Extrakt Valentin	Extrakt Johannes
Fettsäure, gesättigt	P11	P12	P13	P14
Octansäure (8:0)	1266	1000	1873	583
Decansäure (10:0)	138	93	190	61
Laurinsäure (12:0)	68	17	62	67
Myristinsäure (14:0)	141	174	214	245
Palmetinsäure (16:0)	14102	13425	19150	22782
Stearinsäure (18:0)	5959	2456	10959	1948
Arachidinsäure (20:0)	457	445	523	717
Behensäure (22:0)	436	446	458	577
Lignocerinsäure (24:0)	344	227	215	227
Summe [mg/kg]	22911	18283	33644	27207
Summe [g/kg]	22,9	18,3	33,6	27,2

Tab. 7: Gehalt gesättigter Fettsäuren aus Extrakten der Entölung

	Engel Görlitz BK Brust nicht entölt	Engel Görlitz BK Fuß nicht entölt	Engel Görlitz BK Rest nicht entölt	Valentin Spanabfall von BK 8J entölt	Valentin BK innen 8J entöl	Valentin QS außen 8J entöl	HG Zwickau Brett nicht entölt	Ebersdorfer Altar Gespränge entölt
Fettsäure, ungesättigt	P1	P2	P3	P4	P5/1	P5/2	P6	P7
Palmitoleinsäure (16:1)	93	120	172	60	7	52	145	57
Ölsäure (18:1)	157001	11341	22283	9560	725	7568	19688	7884
Elaidinsäure (18:1)	908	946	1430	739	62	745	38451	12050
Linolsäure (18:2)	169	93	327	120	10	77	166	87
Linolensäure (18:3)	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG	<NWG
Eicosensäure (20:1)	234	192	306	158	14	130	607	685
Erucasäure (22:1)	387	296	571	320	28	305	1954	70
Summe [mg/kg]	158792	12988	25089	10957	846	8877	61011	20833
Summe [g/kg]	158,8	13,0	25,1	11,0	0,85	8,9	61,0	20,8

Tab. 8: Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Probenmaterial

	Johan- nes BK Rand 2J entölt	Johan- nes BK Mitte 2J entölt	Johan- nes BK Ende innen 2J entölt	Johan- nes QS Ober- fläche 2J entölt	HG Zwickau Rand- probe Brett	Modell PK Püschner 3a Linde	Modell PK Püschner 3b Kiefer	Modell PK Püschner 3a Tanne	Modell PK Püschner 3b Balsa
Fettsäure, ungesättigt	P8/1	P8/2	P8/3	P8/4	P9	P10/1	P10/2	P10/3	P10/4
Palmitoleinsäure (16:1)	147	166	153	125	184	48	96	68	169
Ölsäure (18:1)	23217	25111	23814	20172	18533	11334	15014	15344	38341
Elaidinsäure (18:1)	1587	2252	1596	1207	40666	660	1209	1004	2266
Linolsäure (18:2)	181	100	118	188	258	1278	2258	3445	4883
Linolensäure (18:3)	0	0	0	29	39	1039	1627	4644	3502
Eicosensäure (20:1)	348	357	343	300	470	127	161	161	396
Erucasäure (22:1)	580	609	598	500	1306	7	10	17	26
Summe [mg/kg]	26060	28595	26622	22521	61456	14493	20375	24683	49583
Summe [g/kg]	26,1	28,6	26,6	22,5	61,5	14,5	20,4	24,7	49,6

Tab. 9: Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Probenmaterial

	Extrakt kleiner Kessel	Extrakt großer Kessel	Extrakt Valentin	Extrakt Johannes
Fettsäure, ungesättigt	P11	P12	P13	P14
Palmitoleinsäure (16:1)	109	138	157	249
Ölsäure (18:1)	11971	9309	245557	16002
Elaidinsäure (18:1)	25796	32317	1514	61748
Linolsäure (18:2)	3096	3159	2275	443
Linolensäure (18:3)	5838	20180	2692	97
Eicosensäure (20:1)	307	648	452	727
Erucasäure (22:1)	475	519	663	1650
Summe [mg/kg]	47592	66270	253310	80916
Summe [g/kg]	47,6	66,3	253,3	80,9

Tab. 10: Gehalt ungesättigter Fettsäuren aus Extrakten der Entölung

	Engel Görlitz BK Brust nicht entölt P1	Engel Görlitz BK Fuß nicht entölt P2	Engel Görlitz BK Rest nicht entölt P3	HG Zwickau Brett nicht entölt P6	HG Zwickau Rand- probe Brett P9	Modell PK Püschner 3a Linde P10/1	Modell PK Püschner 3b Kiefer P10/2	Modell PK Püschner 3a Tanne P10/3	Modell PK Püschner 3b Balsa P10/4
Fettsäure (ungesättigt)	158,8	13,0	25,1	61,0	61,5	14,5	20,4	24,7	49,6
Fettsäure (gesättigt)	29,4	35,2	35,1	25,8	29,4	10,2	11,8	10,6	31,8
Summe [g/kg]	188,2	48,2	60,2	86,9	90,8	24,7	32,2	35,2	81,4

Tab. 11: Zusammenfassung Fettsäuregehalte - nicht entölter Proben

	Valentin Spanabfall von BK 8J entölt P4	Valentin BK innen 8J entölt P5/1	Valentin QS außen 8J entölt P5/2	Ebersdorfer Altar Gespränge ?J entölt P7	Johannes BK Rand 2J entölt P8/1	Johannes BK Mitte 2J entölt P8/2	Johannes BK Ende innen 2J entölt P8/3	Johannes QS OF 2J entölt P8/4
Fettsäure (ungesättigt)	11,0	0,8	8,9	20,8	26,1	28,6	26,6	22,5
Fettsäure (gesättigt)	17,8	0,8	7,5	57,7	38,0	36,3	39,0	34,1
Summe [g/kg]	28,7	1,7	16,3	78,6	64,1	64,9	65,6	56,6

Tab. 12: Zusammenfassung Fettsäuregehalte - entölter Proben

	Extrakt kleiner Kessel ?J entölt	Extrakt großer Kessel ?J entölt	Extrakt Valentin 8 J entölt	Extrakt Johannes 2 J entölt
	P11	P12	P13	P14
Fettsäure (ungesättigt)	47,6	66,3	253,3	80,9
Fettsäure (gesättigt)	22,9	18,3	33,6	27,2
Summe [g/kg]	70,5	84,6	287,0	108,1

Tab. 13: Zusammenfassung Fettsäuregehalte – Extrakte

3.2.4 Zusammenfassung

3.2.4.1 Nicht entölte Proben

Der höchste gemessene Gehalt an Fettsäuren (gesättigt und ungesättigt) wurde in Probe 1 (Engel Görlitz, Brust) gefunden. Innerhalb der Figur nimmt dann der Fettsäureanteil nach unten hin signifikant von 188 g/kg über 60 g/kg auf 48g/kg im Fuß ab. Verursacht wird dieser Unterschied hauptsächlich durch den Gehalt an ungesättigten Fettsäuren. Die Menge gesättigter Fettsäuren ist über den Längsschnitt ähnlich (29 g/kg bis 35 g/kg).

Demgegenüber ist die Verteilung der Fettsäuregehalte im nicht entölte Brett (Heiliges Grab Zwickau) relativ homogen. Proben aus dem Randbereich zeigen dieselben Konzentrationen von ca. 90 g/kg wie in der Mitte, sowohl bei den gesättigten als auch den ungesättigten Fettsäuren.

Bei den mit einer Fettsäuremischung getränkten Modellprüfkörpern 10/1 bis 10/4 spiegeln die Fettsäuregehalte die generelle Tränkbarkeit aufgrund der Holzart wieder. Am wenigsten enthielt Lindenholz, gefolgt von den Nadelhölzern Kiefer und Tanne. Der höchste Gehalt wurde aus Balsaholz extrahiert, da hier vermutlich auch die größte Menge aufgenommen wurde. Erstaunlicherweise wurde mit 81 g/kg im Vergleich zum Gehalt von Probe P1 des Görlitzer Engels gerade mal die Hälfte an Fettsäure extrahiert. Auch die Gehalte im Kiefern und Tannenholz liegen unterhalb den Konzentrationen der noch nicht entölte Realproben. Dabei ist der Anteil ungesättigter und besonders mehrfach ungesättigter Fettsäuren (Linol- und Linolensäure) am Gesamtgehalt in den Modellproben signifikant höher als in den gealterten Originalproben, was mit Sicherheit auf den oxidativen Abbau über die Zeit zurückzuführen ist. Ausnahme ist auch hier wieder Probe 1 (Brust Görlitzer Engel), wo ein sehr hoher Gehalt an Ölsäure gefunden wurde. Neben der einfach ungesättigten Ölsäure stellen die ebenfalls einfach ungesättigten Fettsäuren Elaidinsäure und Erucasäure die Hauptabbauprodukte dar, welche sich auch nicht weiter oxidieren lassen. Hauptbestandteile der gesättigten Fettsäuren bilden Stearinsäure und Palmetinsäure. Auffällig war ein hoher Anteil an Lignocerinsäure im Modellprüfkörper aus Lindenholz.

3.2.4.2 Entölte Proben

Bei Betrachtung der entölte Proben ergibt sich ein sehr differenziertes Bild.

Die geringsten Gehalte an Fettsäuren fanden sich erwartungsgemäß in den Proben des Heiligen Valentin nach achtjähriger Behandlung. Dabei reichten die Konzentrationen von 1,7 g/kg im Inneren der Figur bis 16,3 g/kg in einem gefassten Querschliff der Außenseite. Eine andere Probe (Spanabfall eines Bohrkerns) zeigte eine Konzentration von 28,7 g/kg. Es ist anzunehmen, dass in dem 8 Jahre andauernden Prozess Öl entweder vom Inneren an die Oberfläche gewandert ist oder aber das Innere der Figur von vornherein keine so hohe Ölbelastung aufwies. Die teilweise gefassten Querschliffproben enthalten aber selbst nach 8 Jahren noch so hohe Ölkonzentrationen wie frisch getränkte

Modellhölzer. Leider liegen derzeit keine Messungen des Ausgangszustandes von vor 8 Jahren vor, so dass eine Bewertung des Abreicherungsgrades sehr schwierig ist. Im Vergleich zu den Ausgangsgehalten, welche in Führungsbrettern des Zwickauer Doms gemessen wurden, könnte von einem Abreicherungsgrad von 70% an der Außenseite und 98% im Inneren ausgegangen werden.

Anders gestalten sich die Verhältnisse in der 2 Jahre lang entölten Figur des Heiligen Johannes aus dem Zwickauer Dom. Hier fand sich eine nahezu homogene Verteilung der Fettsäuregehalte von ca. 65 g/kg über den gesamten Querschnitt der Figur. Ein oberflächlich genommener Querschleiff enthielt 56,6 g/kg. Diese Konzentrationen liegen verglichen mit denen des 8 Jahre lang behandelten Heiligen Valentin doppelt bis dreifach so hoch und überschreiten auch die der frisch getränkten Modellprüfkörper.

Den höchsten Gehalt an noch vorhandenen Fettsäureresten enthielt aber mit 78,6 g/kg die Gesprängeprobe des Ebersdorfer Altars, wobei hier der Anteil an gesättigten Fettsäuren mit 57,7 g/kg dreimal so hoch war wie der der ungesättigten.

3.2.4.3 Extrakte

Die Fettsäuregehalte der analysierten Extrakte sind erwartungsgemäß um ein Vielfaches höher als die der entölten Proben.

Tabelle 7 stellt die Fettsäuregehalte der Proben des Heiligen Valentin und des Heiligen Johannes mit den entsprechenden Extraktgehalten gegenüber.

	Valentin Spanabfall von BK 8J entölt	Valentin Extrakt 8 J entölt	Johannes BK Ende innen 2J entölt	Johannes Extrakt 2 J entölt
	P4	P13	P8/3	P14
Fettsäure (ungesättigt)	11,0	253,3	26,6	80,9
Fettsäure (gesättigt)	17,8	33,6	39,0	27,2
Summe [g/kg]	28,7	287,0	65,6	108,1

Tab. 14: Gegenüberstellung Restgehalte an Fettsäuren in entölten Proben und Gehalte im Extrakt

Es fällt auf, dass die Gehalte an ungesättigten Fettsäuren in den Extrakten verglichen mit denen in den entölten Proben stark erhöht sind, während die gesättigten Fettsäuren nur in der 8 Jahre alten Extraktprobe eine höhere Konzentration aufweisen als in der entölten Probe. Der Extrakt der Figur des Heiligen Johannes weist nach 2-jähriger Entölung einen geringeren Wert gesättigter Fettsäuren auf.

Die Extrakte des kleinen und großen Kessels zeigen ein ähnliches Fettsäurespektrum mit einem erhöhten Gehalt an ungesättigten Fettsäuren, liegen in den Fettsäurekonzentrationen jedoch noch weit unter denen der Extrakte des Heiligen Valentins und des Heiligen Johannes.

3.3 Nachstellen der Verölung

Um Aussagen über die Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von verölten Holzobjekten zu erlangen, wurden Holzprobekörper mit Öl-Extrakt aus der Entölungsanlage des Restaurierungsateliers Püschner getränkt.

Für die Tränkung von Probekörpern zur Nachstellung der des Restölanteils nach der Entölung wurden Öl-Extrakte aus dem kleinen und großen Kessel des Restaurierungsateliers Püschner seit 2015 verwendet.⁴⁹ Da sich die Gesamtmenge an Tränkmittel ca. 6 l betrug mußten Öl-Extrakte aufgrund der Verfügbarkeit aus beiden Kesseln verwendet werden.

Wie in Tabelle 15 gezeigt, unterscheiden sich die Anteile der gesättigten und ungesättigten Fettsäuren sowie sämtliche weiteren Bestandteile der Öl-Extrakte aus beiden Kesseln unwesentlich, so daß die Verwendung verschiedener Öl-Extrakte unwesentlich war.

Auf die Herstellung von Modellsubstanzen entsprechend der Analysen der Abbauprodukte/ Zersetzungsprodukte verölter Holzobjekt sowie Extrakte der Entölung wurde aufgrund der komplexen chemischen Zusammensetzung verzichtet.

Fettsäuren	Öl-Extrakt			
	kleiner Kessel	großer Kessel	HI. Valentin	HI. Johannes
	P11	P12	P13	P14
ungesättigt	47,6	66,3	253,3	80,9
gesättigt	22,9	18,3	33,6	27,2
Summe [g/kg]	70,5	84,6	287,0	108,1

Tab. 15: Fettsäureanteile, Öl-Extrakte



Abb. 64: original Flasche Puckelin

⁴⁹ DBU-Projekt AZ 28606-45: *Entwicklung und modellhafte Erprobung einer Technologie zur zerstörungsfreien Extraktion und Restaurierung von biozid und umweltgeschädigten Holzobjekten*, Dipl.-Rest. Karsten Püschner, 2015



Abb. 65: Großer Kessel, Entölungautoklav, Restaurierungsatelier Püschner



Abb. 66: Großer Kessel, Entölungautoklav, Restaurierungsatelier Püschner, Detail



Abb. 67: Öl-Extrakt

3.3.1 Probekörperauswahl

Die Prüfkörperdimensionen wurden anhand der Normen für die Bestimmung der Druckfestigkeit festgelegt. Laut DIN 52185 sollen die Proben für den Druckversuch längs zur Faser eine Kantenlänge von $a=20$ mm betragen und in Faserrichtung eine Länge des 1,5 bis 3-fachen aufweisen.

DIN 52192 gibt für den Druckversuch quer zur Faser ebenfalls eine Kantenlänge des quadratischen Querschnitts von $a=20$ mm und eine Länge des 3-fachen vor.

Es ergeben sich folglich Prüfkörperdimensionen für die folgenden Untersuchungen von 20 x 20 x 60 mm.

3.3.2 Kiefer – natürlich degradiert

Für die durchgeführten Untersuchungen standen durch Anobien degradierte Dielenbretter zur Verfügung. Da die Holzart nicht bekannt war, musste vorerst eine mikroskopische Bestimmung durchgeführt werden. Die Mikroskopie des Radialschnittes zeigte im Kreuzungsfeld jeweils ein bis zwei große Fenstertüpfel, was auf die Holzart Kiefer schließen läßt.

Aufgrund der natürlichen Degradierung gab es große Dichteunterschiede zwischen den Prüfkörpern. Um die Messergebnisse vergleichbar zu machen, fand eine Vorsortierung statt. Für die Tränkungen und Festigkeitsmessungen wurden schließlich Probekörper mit einer Dichte zwischen 460 kg/m³ und 540 kg/m³ verwendet.



Abb. 68: durch Holzschädlinge degradierte Kiefernholzprüfkörper

2.3.3 Linde – künstlich degradiert

Da die zu restaurierenden Kunstwerke hauptsächlich aus Lindenholz geschnitzt wurden, sollen die Untersuchungen neben dem degradierten Kiefernholz parallel auch an Lindenholz durchgeführt werden. Da es sich trotz großer Bemühungen als schwierig erwies degradierte Originalsubstanz zu beschaffen, wurde entschieden, native Linde künstlich zu degradieren.

Die Degradation der nativen Linde erfolgte über mehrere Durchbohrungen mit einem 2 mm Bohrer mittels Bohrlehre.



Abb. 69: Bohrlehre

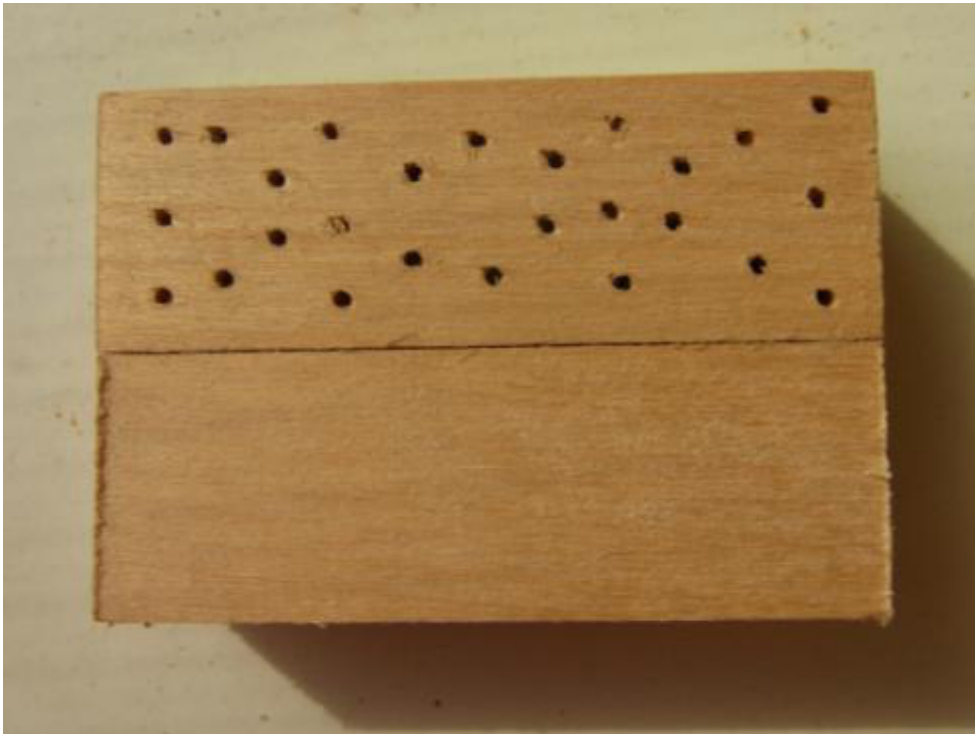


Abb. 70: Holzprüfkörper nativer und künstlich degradiertes Linde

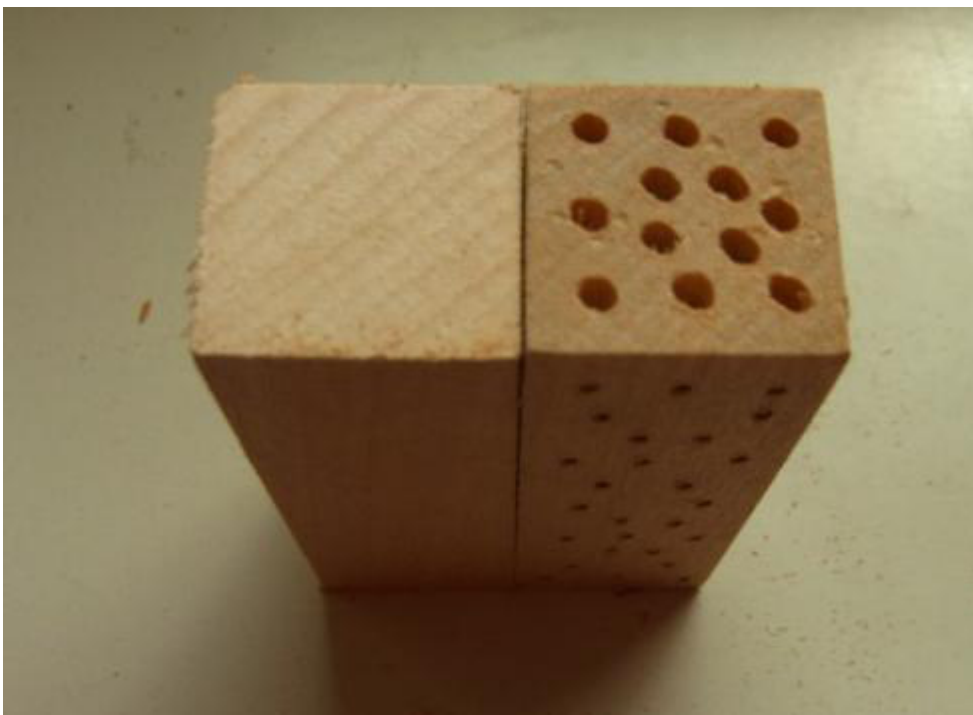


Abb. 71: Holzprüfkörper nativer und künstlich degradiertes Linde

3.3.4 Herstellung eines definierten Verölungsgrades

Um die Situation einer durch Puckelin verölten Originalsubstanz nach der Entölung nachzustellen, wurde die Figur Johannes des Täufers des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom herangezogen. Die bisher zur Verfügung stehenden relevanten Daten wurden zuvor Anfang 2019 durch A. Fuhrmann et al.⁵⁰ durch die Auswertung von Röntgen-Computertomographie-Untersuchungen erzeugt.

Beruhend auf den CT-Daten wurde ein Volumen von 2619 cm³ bestimmt. Die Dichte der ölgetränkten Figur beläuft sich somit auf 0,80 g/ cm³. Fuhrmann gibt für natives Lindenholz eine Dichte von 0,53 g/ cm³ bei 12-15 % Holzfeuchte⁵¹ an. Andere Quellen geben für natives Lindenholz bei Normalfeuchte (5-15 %) eine durchschnittliche Dichte von 0,5 g/ cm³.⁵² Zudem ist die Annahme der Dichte durch die Degradation durch Holzschädlinge mit ca. 0,5 g/ cm³, trotz Hinweis auf eine geringere anzunehmende Dichte, als zu vage zu betrachten.

Sämtliche physikalischen Angaben zum Ausgangszustand der Figur des HI. Johannes in der nativen und degradierten Form des Holzes sind Annahmen, welche soweit wie möglich verifiziert werden sollten, um den eigentlichen Grad der Verölung bzw. Entölung bestimmen zu können. Daher wurden durch Holzschädlinge degradierte Kiefernholzproben herangezogen, bei denen die geringste Dichte bei ca. 0,4 g/ cm³ (Abb. 74). Native Kiefer besitzt eine Dichte von 0,5 – 0,58 g/ cm³.

Vergleicht man nun den Zertsörungsgrad der Kiefernholzproben mit den Makroaufnahmen an den Bruchstellen der Figur des HI. Johannes, so ist die Holzstruktur im Gegensatz zur Kiefer nicht mehr vorhanden (Abb. 75). Andere Beispiele, wie die Führungsbretter des Heiligen Grabes, zeigen, daß die physikalische Holzmatrix nicht durch die Verölung zerstört wurde, so daß der Schädigungsgrad der Figur des HI. Johannes schon vor der Verölung eingetreten war. Es ist somit davon auszugehen, daß die Figur des HI. Johannes vor der Verölung eine Dichte unter 0,4 g/ cm³ besaß.

Ausgehend von den Gewichten des HI. Johannes vor und nach der vierjährigen Extraktion hat dieser 75 g bzw. 4 % des Ausgangsgewichtes verloren. Er wog vor der Extraktion 2095 g. Beruhend auf Fuhrmanns Daten, berechnet sich der Ölgehalt der Figur auf mindestens 37 %. Dies würde nach Fuhrmann eine 10 % Abreicherung des Ölanteils bedeuten. Weiter wurden auch andere Bauteile des Heiligen Grabes mit einem Ölanteil von 45-50 % bestimmt, was unter der Annahme einer Dichte von 0,4 g/ cm³ und weniger der Figur des HI. Johannes im degradierten Zustand vor der Verölung entsprechen würde.

Es ist somit davon auszugehen, daß die Figur des HI. Johannes ca. 50 % Gewichtsanteil mit Öl versehen war und durch die Extraktion eine Abreicherung von nur 5 % erreicht wurde.

Johannes der Täufer	
Provinienz	Heiliges Grab, Zwickauer Dom
Entstehungszeit	1507
Bildhauer	Michael Heuffner (1483-1511)
Größe/ Material	Höhe: ca. 40 cm, Tiefe ca. 10 cm (Lindenholz, ungefaßt)
Gewichte Öl-Extraktion	nach 4 Jahren (Autoklav)
vorher	2095 g
nacher	2020 g

Tab. 16: HI. Johannes, Zwickau

⁵⁰ Fuhrmann, A.; Hietschold, V.; Eisbein, M.; Püschner, K.; Weiß, B.: *Extraktion ölgetränkter Holzobjekte. Prozesskontrolle an einem Beispiel*, in: VDR Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, Heft 1, S. 73-83, 2019

⁵¹ WAGENFÜHR, R.: *Holzatlas*. 6. Aufl., Leipzig, 2007

⁵² RIJSDIJK, J. F.; LAMING, P. B.: *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Dordrecht, Boston, London, 1994



Abb. 72: Figur des HI. Johannes des Heiligen Grabes, Zwickauer Dom, vor der Entölung



Abb 73: Figur des HI. Johannes des Heiligen Grabes, Zwickauer Dom, nach der Entölung



Abb. 74: durch Holzschädlinge degradierter Kiefernholzprüfkörper



Abb. 75: Makroaufnahme einer Bruchstellen der Figur des HI. Johannes

Für die Tränkung von Holzprüfkörper mit Öl-Extrakt war es im Vorfeld notwendig den Anteil an Öl und 1,3-Dioxolan, welcher durch die Entölung des Extrakt anreicherte, zu bestimmen. Hierfür wurde eine kleine Menge Öl-Extrakt auf 80 °C erhitzt, so daß die flüchtigen Bestandteile verdampfen konnten (Abb. 76). Durch die Gewichtsreduzierung des Öl-Extraktes ergab sich der Anteil, der als flüssige Phase in die Holzprüfkörper einzubringen war.

Die Vorgabe der jeweiligen Dichte der Holzprüfkörper wurde herangezogen, um wiederum unter Hinzugabe von 1,3-Dioxolan zum Öl-Extrakt das richtige Verhältnis des Tränkmittels für die Tränkung zu erhalten, welches den Restölanteil von 10 % und 30 % in den Holzprüfkörpern darstellen. Die Holzprüfkörper wurden so ausgewählt, daß sie dem Mittelwert einer Probereihe entsprechen.

Der Autoklav konnte mit 20 Holzprüfkörpern bestückt werden (Abb. 77). Im Vorfeld wurde ein Vakuum von 0,08 bar gegenüber dem absoluten Druck für 20 min angelegt. Durch das Vakuum konnte die Tränkflüssigkeit in den Autoklaven gesogen werden, wonach bei einem Überdruck von 6 bar über eine Stunde der Tränkvorgang bei 28 °C durchgeführt wurde (Abb. 78).

Abschließend wurden die mit Öl-Extrakt getränkten Holzprüfkörper in einen Wärmeschrank unter einem Laborabzug 24 Stunden bei 80 °C erhitzt, damit das überschüssige 1,3-Dioxolan verdampfen kann (Abb. 80).

Die Gewichtsveränderungen wurden jeweils direkt nach dem Tränkvorgang und nach der Entnahme aus dem Wärmeschrank ermittelt. Um die Reproduzierbarkeit für folgende Behandlungen zu gewährleisten, wurden die Proben mehrere Wochen unter Norm-Klima-Bedingungen bei 20 °C Temperatur und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Dies geschah auch vor der Tränkung.



Abb. 76: Verdampfen des 1,3-Dioxolan (Siedepunkt: 75 °C) aus dem Öl-Extrakt bei 80 °C



Abb. 77: Tränkungsautoklav, Bestückung



Abb. 78: Tränkungsautoklav, Einbringen des Öl-Extrakts als Tränkungsmedium



Abb. 79: Getränkte Holzprüfkörper in der Tränkungswanne



Abb. 80: Holzprüfkörper im Wärmeschrank



Abb. 81: getränkte Holzprüfkörper, künstliche degradierte Linde mit 30 % Öl-Extrakt Anteil und natürlich degradierte Kiefer mit 30 % Öl-Extrakt Anteil

3.4 Arbeiten zur Auswahl geeigneter Festigungsmittel

Um einen ersten Eindruck über die Handhabung, das Verhalten bei der Mischung mit Öl und die erzielten Festigkeiten nach dem Aushärten zu erhalten, wurden Mischungen der verschiedenen Festigungsmittel sowie Festigungsmittel-Öl-Extrakt-Kombinationen hergestellt.

In Frage kommende Festigungsmittel wurden aus den schon seit Jahrzehnten in der Holzkonsolidierung verwendeten Mittel ausgewählt. Hier stand die theoretische Verträglichkeit mit dem Öl-Extrakt im Vordergrund. Daher wurden Epoxidharze und in Lösemittel gelöste Acrylharze herangezogen, da sie auch statisch die besten Festigungsergebnisse liefern.

Das Epoxidharz als Reaktionsharz reagiert mit organischen Säuren und polymerisiert. Hierbei reagieren Epoxyfunktionen mit den Carboxylfunktionen der Säure zu Polymeren. Die Annahme, daß auch Fettsäuren des Öl-Extrakts den Prozeß der Polymerisation von Epoxyfunktionen eher unterstützt als stört, führt zur Verwendung dieser in den Vorversuchen. Um die chemische Verträglichkeit von Epoxidharzen gegenüber dem Öl-Extrakt darzustellen, wurden auch Produkte, welche zur Glasverklebung herangezogen werden, getestet. Auch wenn diese wegen ihrer höheren Viskosität nicht für die Holzfestigung in Frage kommen.

Acrylharze in Lösemitteln sind gegenüber Epoxidharzen einfacher zu verarbeiten und bieten aufgrund ihrer bekannten Langzeitbeständigkeit ein vielfältiges Einsatzgebiet in der Holzkonservierung. Die gute Lösbarkeit von Öl in Benzin führte zu der Verwendung von Degalan in Siedegrenzbenzin in den Vorversuchen.

Folgende Systeme sind verwendet worden:

System 1:

Epoxidharzsystem der Firma ipox chemicals GmbH

(nach Beratung durch Dr. Georg Göttle, Geschäftsführer ipox chemicals GmbH)

Komponenten:

- EP-Harz: ER 1042 (Basis: Bisphenol-A-/Bisphenol-F-Diglycidylether)
- EP-Harzhärter: EH 2064 (Basis: Modifizierte aliphatische Polyamine)

Mischungsverhältnis lt. Technischem Datenblatt: 40g Härter/100g Harz

System 2:

Epoxidharzsystem Araldite 2020/A mit Härter Araldite 2020/B (100g:30g)

System 3:

Epoxidharzsystem Araldite 2020/A mit Härter Jeffamine (Verhältnis 3:1)

System 4:

Epoxidharzsystem HXTAL NYL-1

System 5:

Acrylharzsystem Degalan® P 28 in Siedegrenzbenzin 100-140 C° (Verhältnis 1:4)

3.4.1 Petrischalenversuche

Als Vorversuche wurden drei verschiedene Methoden als Auswahlverfahren für ein geeignetes Holzfestigungsmittel für mit Restöl versehene Holzobjekte herangezogen.

Zum einen wurden die verschiedenen Festigungsmittel mit Öl-Extrakt in Petrischalen gemischt, um das Verhalten während der Aushärtung zu untersuchen sowie optische und haptische Erkenntnisse nach der Aushärtung zu erlangen.

Die Systeme eins bis fünf wurden in reiner Form sowie mit 10 % und 30 % Extrakt-Ölanteil versehen in Aluminiumpetrischalen gefüllt und bei Raumtemperatur ausgehärtet. Anschließend wurden die Petrischalen optisch und haptisch verglichen.

Das System eins und zwei ließen sich nur sehr schwer oder gar nicht mit dem Öl-Extrakt mischen und polymerisierten in diesem Zustand aus (Abb. 82/ 83). Die Systeme drei, vier und fünf durchmischten sich durch mechanisches rühren gut (Abb. 84-86). Wobei die Systeme vier und fünf sich auch ohne rühren mit dem Öl-Extrakt durchmischten hätten

Bei allen Systemen war ein verzögertes Polymerisieren bei zugegebenen Extrakt-Ölanteilen zu verzeichnen. Wobei die Polymerisation bei dem 30 % Extrakt-Ölanteil am langsamsten fortschritt.

Die Betrachtung der einzelnen Festigungsmittel nach der Polymerisation zeigte bei den Systemen eins, zwei und drei eine leicht klebrige Oberfläche. Hingegen die Systeme vier und fünf nicht klebrig waren. Die Oberflächenstruktur des Systems aus Araldite 2020 Harz XW 396 und Jeffamine stellt sich uneben fast Orangenhautartig dar. Die Struktur ist bei 10 % Öl-Extraktanteil feinteiliger als bei 30 %. Innere Spannungen während der Polymerisation führen vermutlich zu diesem Phänomen.

Zudem zeigte sich, daß die subjektive Härte der Festigungsmittel, festgestellt durch Verschränken der Petrischalen, durch die Zugabe von Öl-Extrakt abnahm. Der höhere 30 % Anteil zeigte jeweils die geringste Steifigkeit. Das Subjektiv härteste System stellte HXTAL NYL-1 dar, welches aber als niedrig viskoser Glasklebstoff nicht als Holzfestigungsmittel in Frage kommt. HXTAL NYL-1 gilt als chemisch sehr reines Epoxidharz, was vermutlich für die geringe chemische Wechselwirkung mit dem Öl-Extrakt zu tun hat. Das System fünf zeigte eine gegenüber dem reinen Festigungsmittel Degalan nur eine geringfügige Erweichung in Verbindung mit dem Öl-Extrakt. Die Epoxidharze der Systeme eins und drei sind mit Öl-Extrakt versehen sehr viel weicher als in reiner Form. Das System zwei war aufgrund der schlechten Mischbarkeit in der Härte kaum beeinflusst.

Die Vorversuche ergeben, daß weitere Untersuchungen an Degalan, dem ipox-Harzsystem sowie Araldite+Jeffamine sinnvoll wären. Bei diesen Systemen kommt es zumindest zum Vermischen des Festigungssystems mit dem Öl-Extrakt.

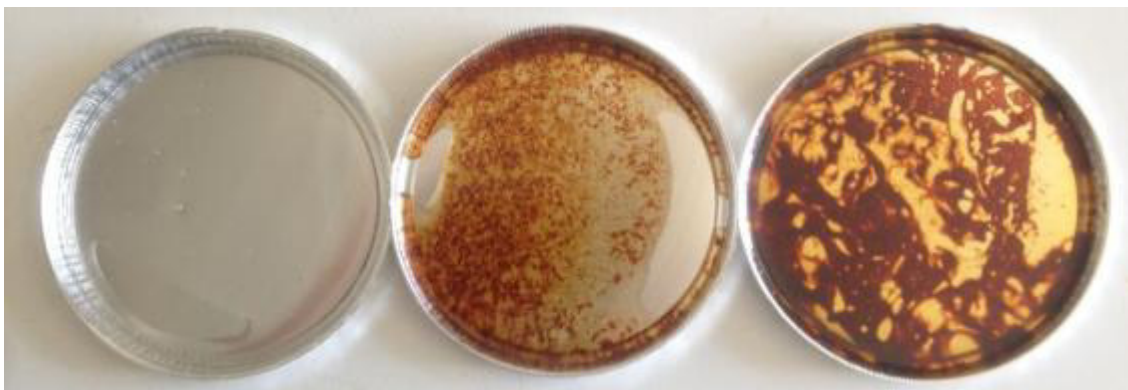


Abb. 82: System 1, Epoxidharz ipox, mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt



Abb. 83: System 2, Epoxidharz Araldite 2020, mit: ohne – Öl-Extrakt

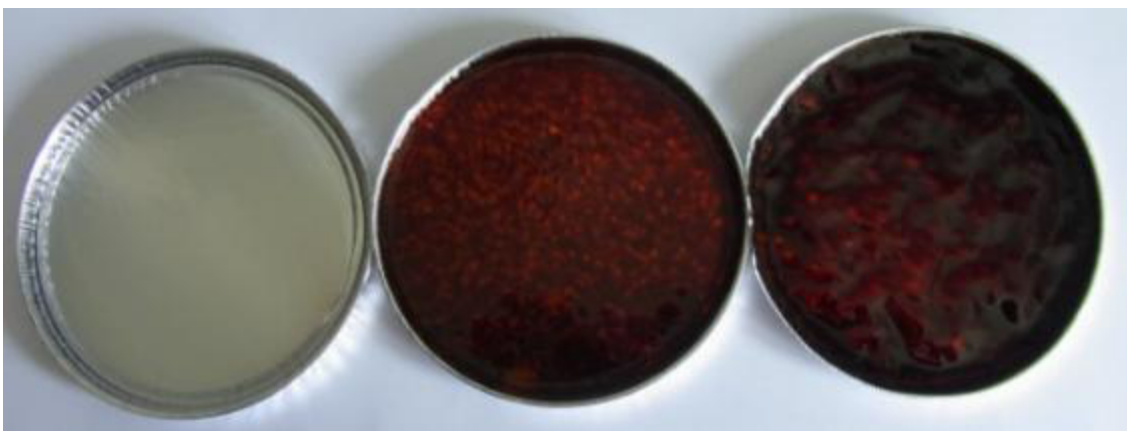


Abb. 84: System 3, Epoxidharz Araldite 2020 Harz XW 396 mit Härter Jeffamine,
mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt



Abb. 85: System 4, Epoxidharz HXTAL NYL-1, mit 30 % Öl-Extrakt



Abb. 86: System 5, Acrylharz Degalan, mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt

3.4.2 Härteprüfung

Die verschiedenen Festigungsmittel sowie die Mischungen aus diesen und dem Öl-Extrakt wurden mittels Druckversuch an der Universal-Prüfmaschine „TIRA test 28100“ auf ihre Härte geprüft (Bild 87/88).

Gemessen wurde jeweils die Kraft, die nötig ist, um das jeweilige Harzsystem 0,2 mm einzudrücken. Aufgrund der unterschiedlichen und undefinierten Schichtdicken, ist ein direkter Vergleich der Werte nicht möglich. Die Werte sollen Näherungswerte und Tendenzen aufzeigen (Tab. 17).

Aus den Vorversuchen wird deutlich, dass der Ölgehalt einen deutlichen Einfluß auf die Festigkeit und das E-Modul hat. Die Beimischung von Öl-Extrakt führt bei allen Festigungsmitteln zu einer Erweichung im Vergleich zum reinen Material. Dies weist auf die Funktion des Öl-Extrakt als Weichmacher hin.

Name	E [MPa]	Fmax [N]	Rm [MPa]	t1 [MPa]
Degalan	1243,16	7778,08	11,004	4,266
Degalan - 10 % Öl-Extrakt	20,30	200,42	0,284	0,100
Degalan - 30 % Öl-Extrakt	13,25	79,88	0,113	0,060
Araldite-Jeffamine	542,96	2461,16	3,482	1,886
Araldite-Jeffamine - 10 % Öl-Extrakt	154,44	867,42	1,227	0,627
Araldite-Jeffamine - 30 % Öl-Extrakt	7,11	99,10	0,140	0,032
Ipox ER 1042/ EH 2064	1245,47	8105,74	11,467	4,466
Ipox ER 1042/ EH 2064 - 10 % Öl-Extrakt	279,99	2983,58	4,221	1,552
Ipox ER 1042/ EH 2064 - 30 % Öl-Extrakt	69,83	2945,68	4,167	0,873
HXTAL NYL-1 - 30 % Öl-Extrakt ⁵³	391,16	3409,62	4,824	1,782

Tab. 17: E-Modul, maximale Kraft, Druckfestigkeit und Dehnungsgrenze ausgewählter Festigungsmittel

⁵³ HXTAL NYL-1 wurde nur mit der Beimischung von 30 % Öl-Extrakt gemessen

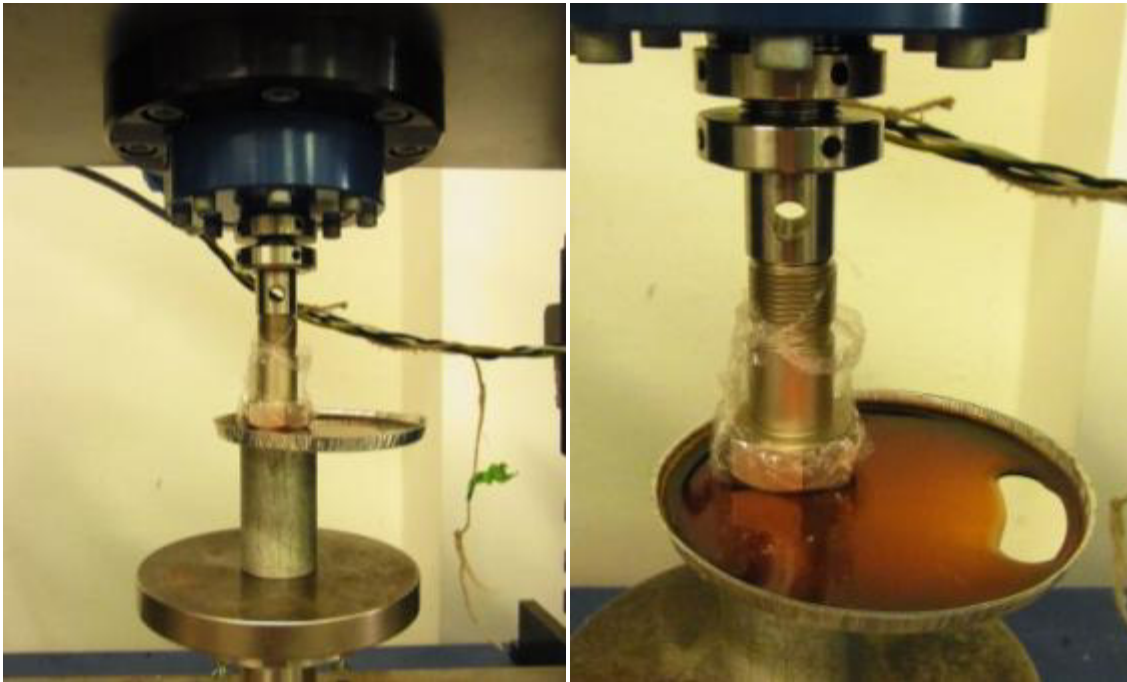


Abb. 87/ 88: Druckprüfung Festigungsmittel

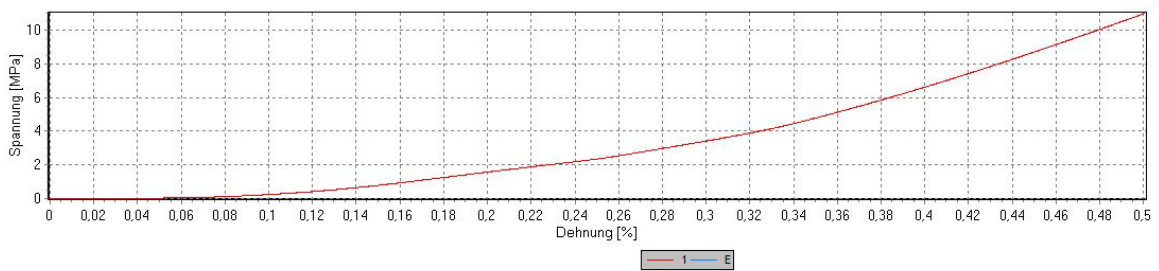


Abb. 89: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan

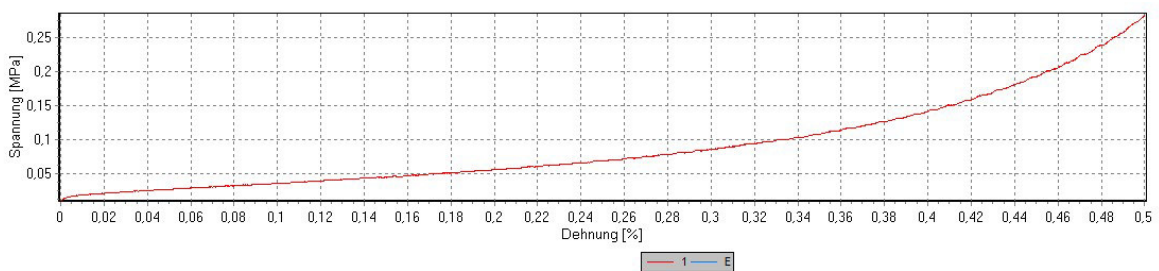


Abb. 90: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan mit 10% Öl-Extrakt

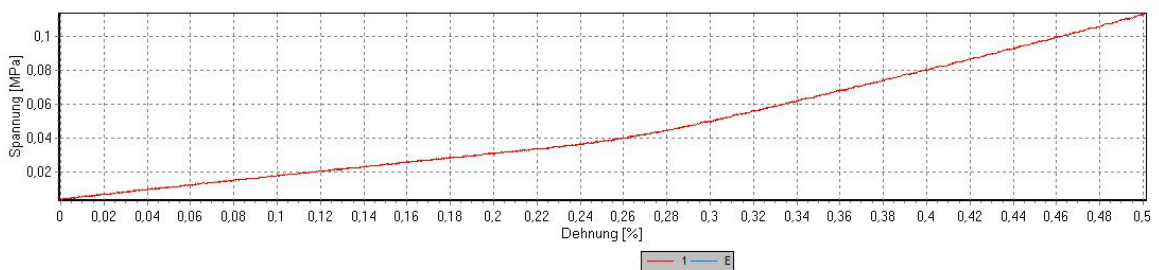


Abb. 91: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan mit 30% Öl-Extrakt

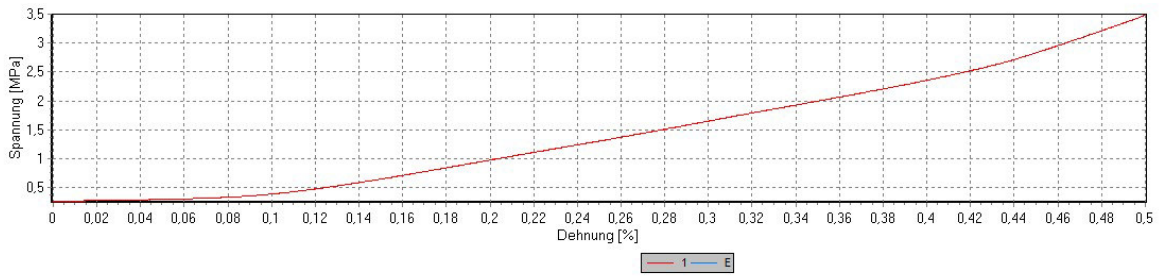


Abb. 92: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 mit Härter Jeffamine

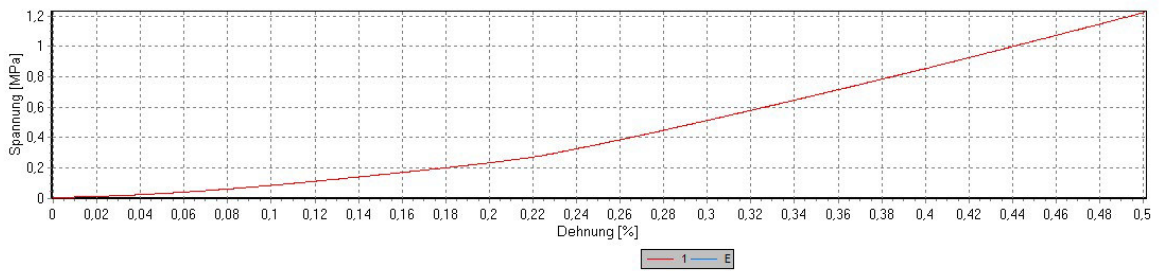


Abb. 93: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 und Härter Jeffamine mit 10% Öl-Extrakt

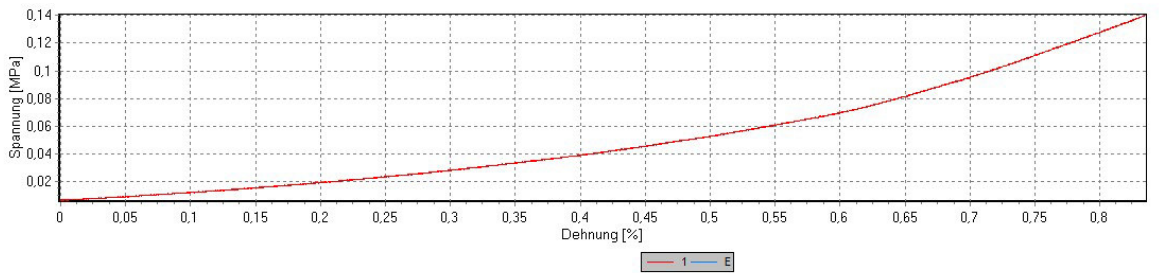


Abb. 94: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 und Härter Jeffamine mit 30% Öl-Extrakt

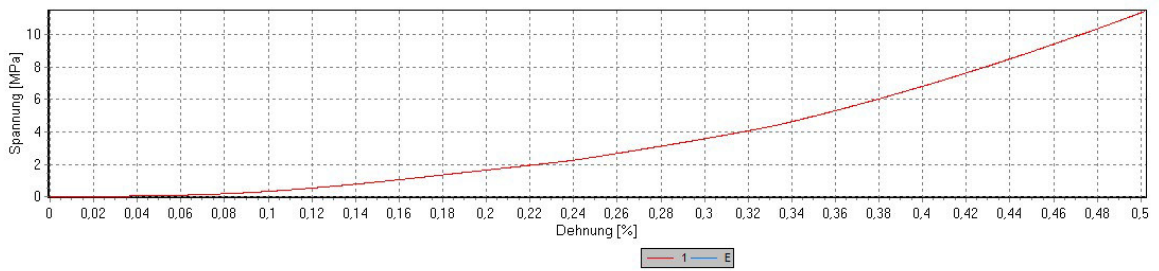


Abb. 95: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Ipox ER 1042/ EH 2064

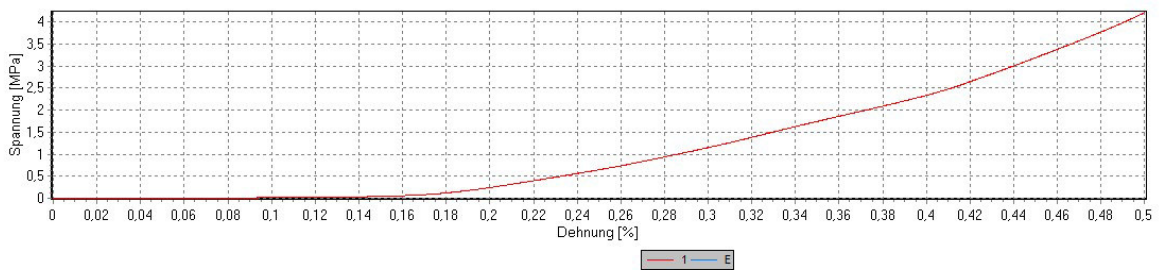


Abb. 96: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Ipox ER 1042/ EH 2064 mit 10% Öl-Extrakt

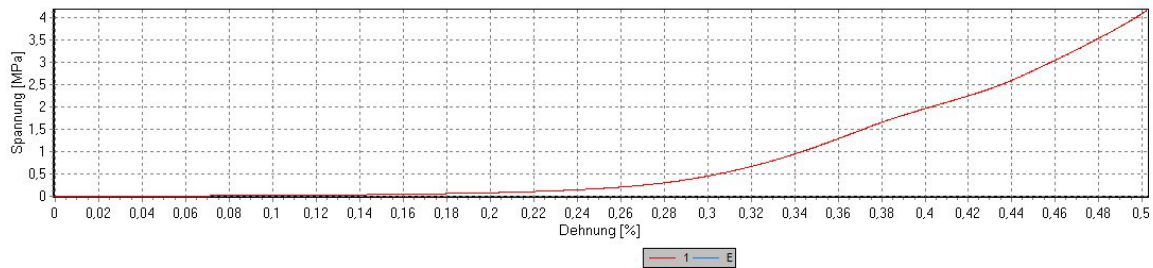


Abb. 97: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von IpoX ER 1042/ EH 2064 mit 30% Öl-Extrakt

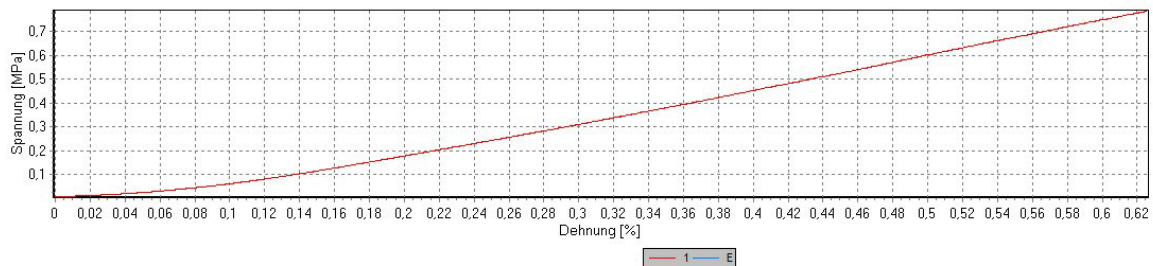


Abb. 98: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von HXTAL NYL-1 mit 30% Öl-Extrakt

3.4.3 Dynamische Differenzkalorimetrie DDK

Für die Messung der Dynamische Differenzkalorimetrie DDK (engl. DSC) der verschiedenen Festigungsmittel bzw. deren Mischung mit Öl-Extrakt wurde das DSC 1 STAR System der Firma METTLER TOLEDO herangezogen, welches am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden zur Verfügung gestellt wurde (Abb. 99).

Die DSC misst den Wärmestrom einer Probe als Funktion der Temperatur oder der Zeit. Mit der DSC können physikalische Umwandlungen und chemische Reaktionen quantitativ erfasst werden.

Wärmestromdifferenzen entstehen durch von der Probe aufgenommene oder freigesetzte Wärme, bedingt durch thermische Effekte, wie beispielsweise Schmelzen, Kristallisieren, chemische Reaktionen, polymorphe Umwandlungen, Verdampfen und viele weitere. Auch spezifische Wärmekapazitäten und ihre Änderung – zum Beispiel während eines Glasübergangs – können über die Wärmestromdifferenz bestimmt werden. Aus den gewonnenen Daten lassen sich reaktionskinetische Daten ableiten.⁵⁴

Unterschiedlicher Temperaturen wirken dabei auf die Polymerisationskinetik und Reaktionsdauer der Probe, so daß die Thermogramme exotherme Peaks zeigen.

Für die DSC-Analyse konnten nur das Produkt Degalan und das Epoxidharzsystem IpoX ER 1042/ EH 2064 herangezogen werden.

Das Thermogramm des Öl-Extraktes wurden im Zyklus bei -30-160 °C und 10 K/ min und -50-220 °C, 10 K/ min gemessen (Abb. 100). Dabei zeigten sich keine gravierenden Veränderungen im Verhalten des Öl-Extrakts.

Das Thermogramm von Degalan als Feststoff und in Siedegrenzbenzin mit dem Zusatz von 10 % und 30 % Öl-Extrakt wurden ausschließlich im Zyklus von -30-160 °C und 10 K/ min analysiert (Abb. 101/ 102). Hierbei ließen sich keine Veränderungen im Polymerisationsverhalten vor allem im Vergleich der verschiedenen Öl-Extraktanteile feststellen. Die linke Grenze zeigt die ungefähre Position der Glasübergangstemperatur an, welche bei allen Thermogrammen nahe der Produktvorgabe von ca. 32

⁵⁴ Frick, A.; Stern, C.: *DSC-Prüfung in der Anwendung*. 2. Aufl., München, 2013

°C (DIN 53765) liegt. Die Glasübergangstemperatur verändert sich durch die Zugabe von Öl-Extrakt folglich kaum.

Die Thermogramme des Epoxidharzes IpoX ER 1042/ EH 2064 wurden im Zyklus -50-220 °C bei 10 K/ min gemessen. Einmal in reiner Form sowie mit 10% und 30 % Öl-Extraktanteil (Abb. 103/ 104). Das reiner Form gemessene Epoxidharz zeigt einen symmetrischen exothermen Peak (Bild 40). Bei der Darstellung in Bild 41 ist das Epoxidharz in den unteren beiden Thermogrammen mit 10 % und 30 % Öl-Extrakt versetzt. Deutlich läßt sich die geringere exotherme Reaktion ablesen, welche mit steigenden Öl-Extraktanteil abnimmt. Die Vernetzung verläuft vermutlich in abgeschwächter und nicht voll ausgeprägter Form. Da es sich bei dem IpoX-System um ein frei kombinierbares Epoxidharzsystem handelt, gibt es keine Angaben über die Glasübergangstemperatur.

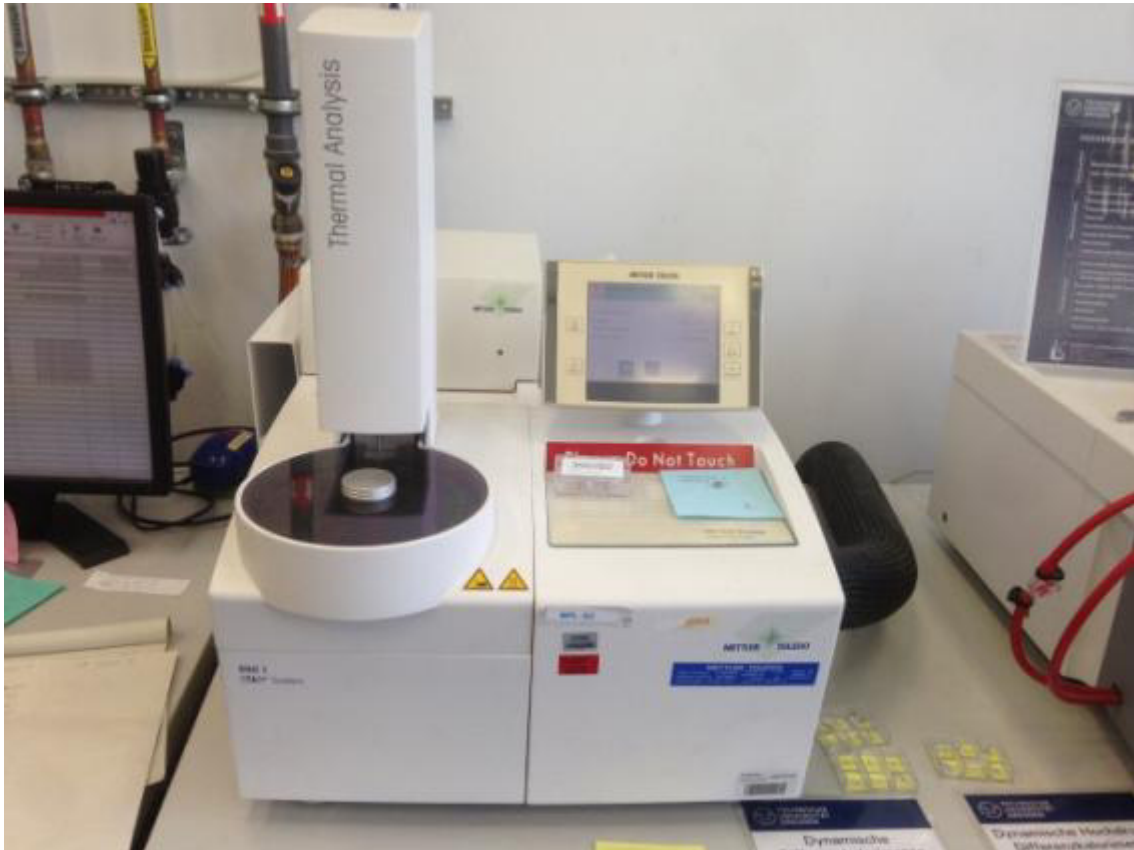


Abb. 99: DSC 1 STAR System der Firma METTLER TOLEDO

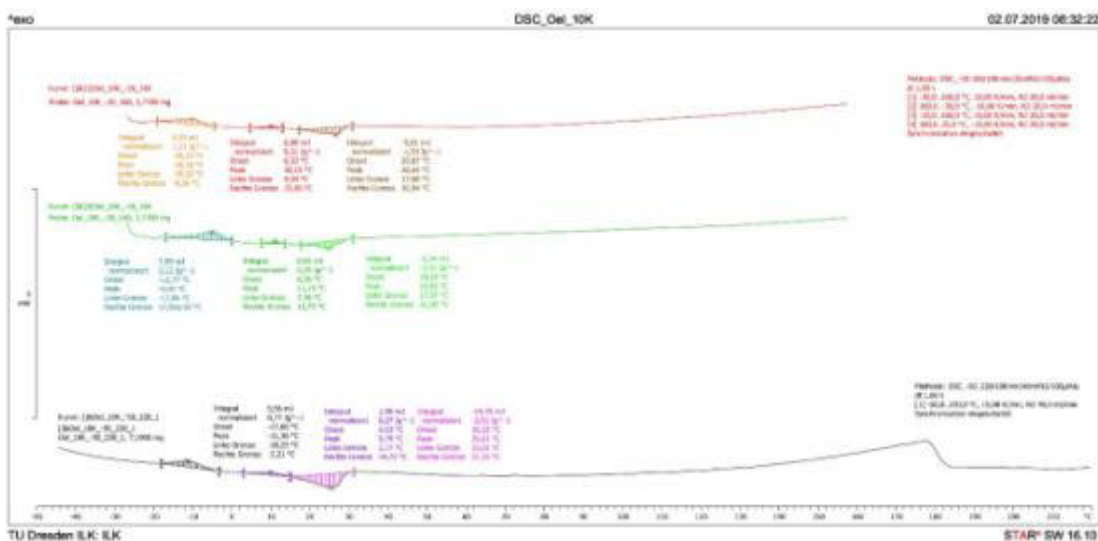


Abb. 100: Thermogramm von Öl-Extrakt, -30-160 °C, 10 K/ min

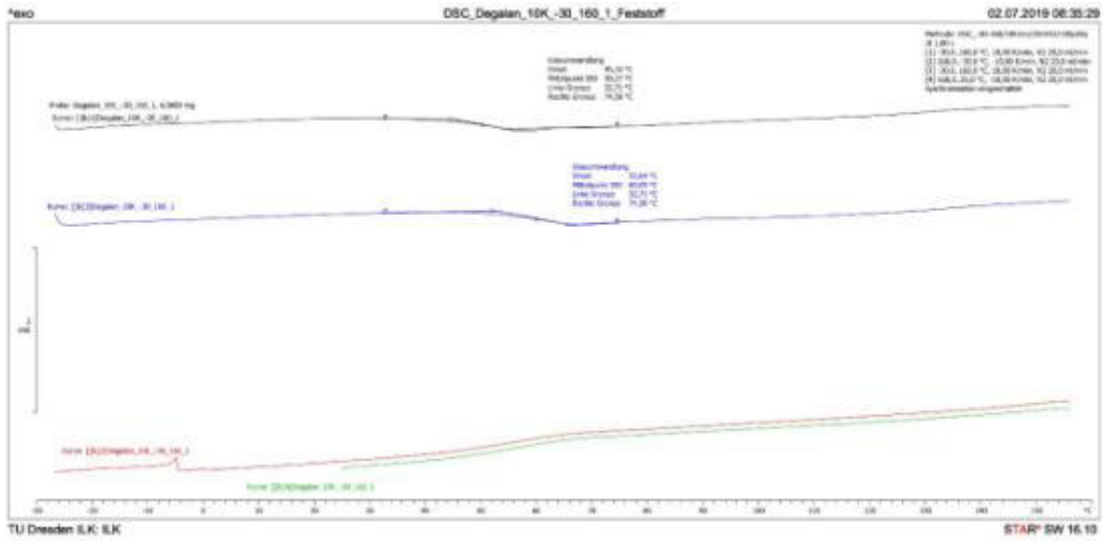


Abb. 101: Thermogramm von Degalan (Feststoff), -30-160 °C, 10 K/ min

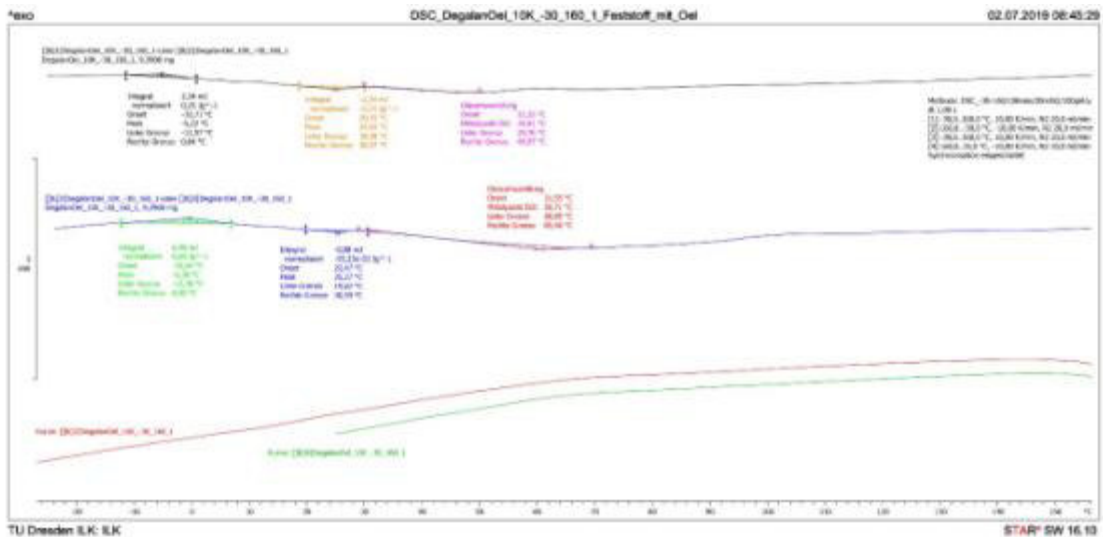


Abb. 102: Thermogramm von Degalan in Siedegrenzbenzin sowie mit 10 % und 30 % Öl-Extrakt, -30-160 °C, 10 K/ min

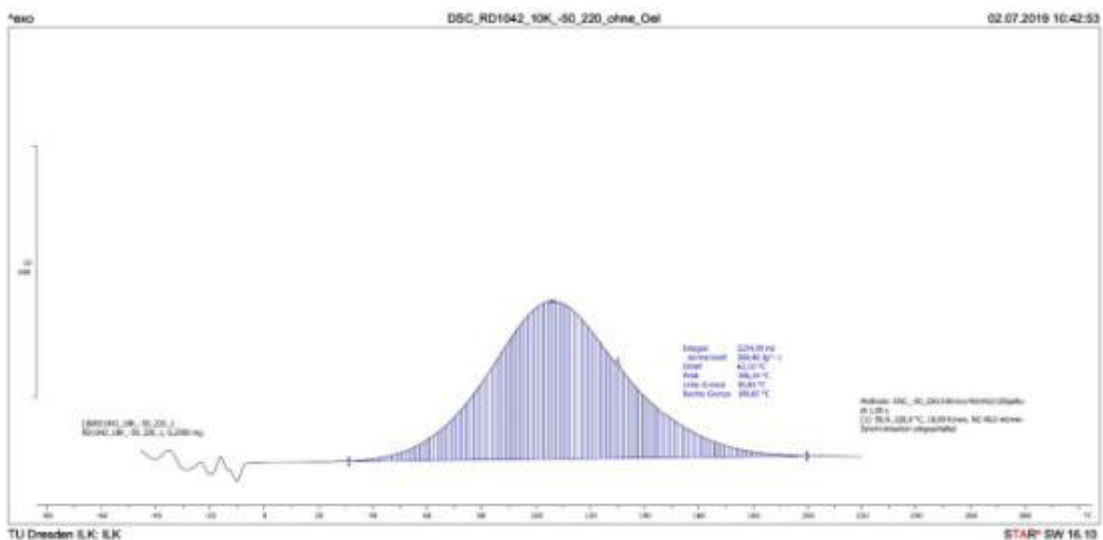


Abb. 103: Thermogramm von Ipox ER 1042/ EH 2064, -50-220 °C, 10 K/ min

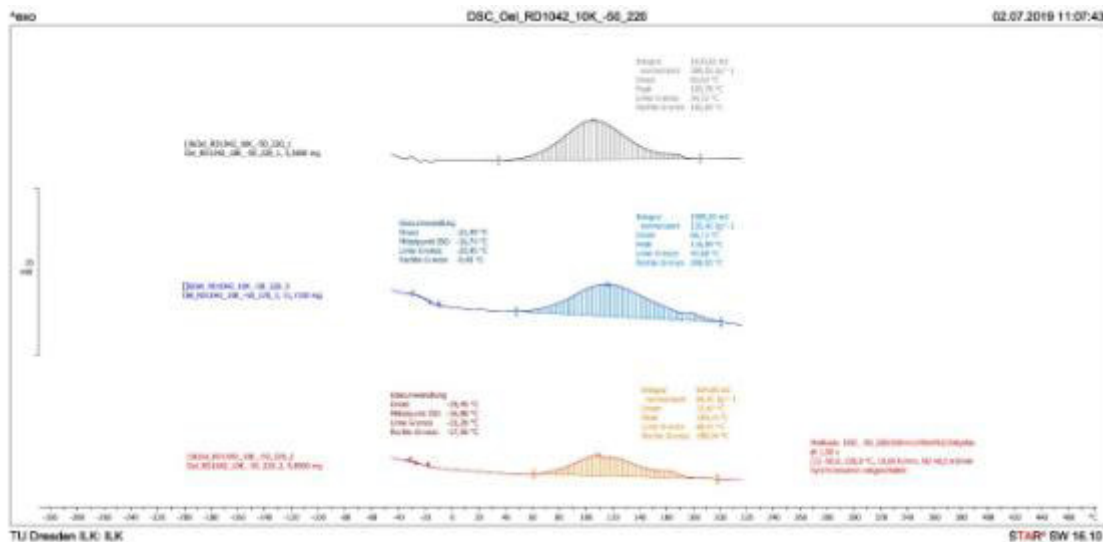


Abb. 104: Thermogramm von IpoX ER 1042/ EH 2064 sowie mit 10 % und 30 % Öl-Extrakt, -50-220 °C, 10 K/ min

Aus den Vorversuchen wird deutlich, dass der Ölgehalt einen starken Einfluss auf die Festigkeit und die Härte der Festigungsmittel hat. Bei allen Systemen war bei zugegebenen Ölanteilen ein verzögertes Polymerisieren zu verzeichnen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einem Restölgehalt im Holz von ca. 10% eine ausreichende Festigung mit ausgewählten Acryl- und Epoxidharzsystemen erzielt werden kann. Bei 30% Ölgehalt im Holz ist eine Festigung mit den untersuchten Mitteln aufgrund der sehr geringen Festigkeitswerte kaum denkbar.

Die Vorversuche zu den chemischen Wechselwirkungen ergeben, dass weitere Untersuchungen an Degalan P28, dem ipox-Harzsystem sowie Araldite mit Jeffamine sinnvoll wären. Bei diesen Systemen kommt es zumindest zum Vermischen des Harzsystems mit dem Öl. Betrachtungen des HXTAL NYL-1-Systems wären auch weiterhin sinnvoll, aufgrund der hohen Viskosität und der bisher wenig getesteten Anwendung zur Holzfestigung wird dieses Epoxidharzsystem jedoch kein weiterer Bestandteil der Untersuchungen sein.

Nach ersten Erkenntnissen kam auch das ipox-System ER 1042 mit EH 2064 für die weiteren Versuche infrage. Für die Entwicklung eines geeigneten Versuchsablaufes für die Drucktränkung fanden weitere Vorversuche statt. Es wurden drei verschiedene Mischungsverhältnisse mit dem Reaktivverdünner RD14 eingestellt (0%, 20% und 60% Reaktivverdünner) und der Temperaturverlauf beim Aushärten gemessen. Bereits nach wenigen Minuten stieg die Temperatur sehr stark an, nach 35 Minuten erreichten alle Mischungen Temperaturen über 100 °C. Dieser Vorversuch zeigt, dass das gewählte Epoxidharzsystem in der untersuchten Einstellung nicht für die Holzfestigung geeignet ist. Aufgrund der schon bei geringen Mengen entstehenden extrem hohen Temperaturen entstünde eine Gefährdung der Holzsubstanz. Das Epoxidharzsystem wurde deshalb für die weiteren Versuche abgewählt, da bei derartig hohen Reaktionstemperaturen auch eine Umsetzung mit dem entwickelten Versuchsaufbau nicht möglich wäre. Bei der für die Drucktränkung nötigen größeren Menge an Festigungsmittel und dem zusätzlich angelegten Druck, würden die Temperaturen sehr stark steigen, auch eine denkbare Kühlung des Systems wäre aufwändig und nicht ausreichend. Mit veränderter Einstellung der Komponenten (z.B. weniger reaktiver Härter), ist eine Anwendung eines ähnlichen Epoxidharzsystems dennoch denkbar.

Wie aus den Vorversuchen hervorgeht wäre auch eine Behandlung der Holzproben mit dem Zweikomponenten-Epoxidharzsystem Araldite 2020/A (30 - 60% Bisphenol-A-Epichlorhydrinharze mit durchschnittlichem Molekulargewicht < 700, 30 - 60% 1,4- Butandiolglycidylether) und Jeffamine (Polyoxypropylendiamin) als Härter denkbar. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig.

Nach der DSC-Messung und anhand der Ergebnisse aus Festigungsversuchen von Ulrich Schiebl wurde Degalan P28 als Festigungsmittel favorisiert.⁵⁵ In den Druckfestigkeitsprüfungen wurden damals bereits gute Festigkeitswerte von Plexigum P28 (heute Degalan P28) erzielt.⁵⁶

Begleitend zur Acrylharztränkung ist ein epoxidiertes Leinöl (ELO) zur Festigung eingesetzt wurden. Das im Projekt experimentell eingesetzte ELO ist strahlensensibilisierend. Die eingesetzte Gammastrahlung soll neben der Polymerisierung des eingebrachten Festigungsmittel gleichzeitig dazu führen, dass Restölanteile zur Polymerisierung initiiert werden.

⁵⁵ SCHIEBEL, U.: *Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz*. in: Petzet, Michael (Hrsg.): Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Bd. 73. München 1993

⁵⁶ SCHIEBL, U.: *Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz*. Holzschutz. Holzfestigung. Holzergänzung. in: Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, S. 15–27, München 1995

3.5 Herstellung gefestigter Modellprüfkörper

Die Wahl eines geeigneten Applikationsverfahrens und Holzfestigungsmitteln hängt von verschiedenen Bedingungen wie, z.B. von Art und Menge des Festigungsmittels, vom Zustand des zu festigenden Holzobjektes sowie von der apparativen Ausstattung ab.

Vor der Anwendung eines dem Laborversuch ähnlichen Vakuum-Druck-Verfahrens in der Praxis müssen jedoch weitere Untersuchungen folgen, beispielsweise zur Dimensionierung entsprechend großer Apparaturen sowie zur möglichen Druckminderung bei stark geschädigter Holzsubstanz. Bei stark zerstörten Objekten wäre beispielsweise ein Vakuum-Normaldruck-Verfahren ohne zusätzliches Anlegen von Überdruck denkbar. Auch anderweitige Einbringverfahren sollten weitergehend untersucht werden. Vorstellbar wäre ein Injektionsverfahren, bei dem das Tränkmittel mithilfe von Injektionsspritzen in Ausflugslöcher von holzerstörenden Insekten oder zusätzlich gebohrte Löcher eingebracht wird. Auch eine Trogtränkung wäre denkbar.

Auch für das Abdampfen des Lösemittels sind verschiedene Verfahren vorstellbar, um den Aushärteprozess zu beschleunigen. Die in den Versuchen angewandte Trocknung bei 28°C erwies sich als schonend aber sehr langwierig. Ein Abzug ist notwendig, da das Abdampfen der Benzindämpfe toxikologisch bedenklich ist. Bei größeren Proben mit dementsprechend mehr Lösemittel, wäre der Zeitaufwand sehr hoch. Um die Aushärtezeit zu verkürzen wäre ein thermokatalytisches Verfahren denkbar, was aber eine gewisse Wärmebelastung des Materials bedeutet. Dabei ist das Wärmeverhalten des Festigungsmittels zu berücksichtigen. Eine andere Variante stellt die strahlenchemische Härtung durch Gamma- oder Ionenbestrahlung dar. Dazu wäre keine Wärmezufuhr notwendig, die Anlagen wären sehr komplex und die Kosten sehr hoch.⁵⁷

3.5.1 Festigungstränkung im Laborautoklaven

Die Parameter der modellhaften Festigungsmitteltränkung wurden an die Öltränkung angelehnt und durch Vorversuche überprüft und angepasst. Während der Tränkung werden die Parameter beibehalten, die Trocknung der Proben wird nach den Erkenntnissen der Vorversuche jedoch nicht im Wärmeschrank durchgeführt. Bei der Aushärtung im Wärmeschrank bei 45°C kam es zur deutlichen Bläschenbildung an der Oberfläche der Probekörper (Abb. 105), was vermutlich auf das große Dampfdruckgefälle bei zusätzlicher Wärmezufuhr und der Glasübergangstemperatur des Acrylharzes bei ca. 32 °C zurückzuführen ist.

Nach der Auswertung sämtlicher Vorversuche fiel die Wahl auf das Acrylharz Degalan P28, gelöst in Siedegrenzbenzin. Das Festigungsmittel lag als Granulat vor und wurde als 30%ige Lösung angemischt. Für weitere Untersuchungen soll eine vollständige Durchtränkung der Probekörper erreicht werden. Dafür wurde erneut ein Vakuum-Druck-Verfahren im Laborautoklaven angewandt. Die Vakuum-Druck-Tränkung verlief mit den selben Parametern wie bei der Öltränkung. Nach 20-minütigem Vakuum, folgte eine einstündige Druckphase bei 6 bar Überdruck. Die Aushärtung erfolgte die ersten zwei Wochen im Abzug bei 28°C und 28 % relativer Luftfeuchte (Abb. 106). Danach wurden die Proben im Normklima bis zur Massekonstanz gelagert.

Es fand eine Volltränkung statt, wobei möglichst viel Festigungsmittel eingebracht werden sollte. Bei einer Konzentration des Degalans mit 30% Feststoff war die Viskosität noch niedrig genug, um eine erfolgreiche und vollständige Tränkung durchführen zu können. Um das Verhalten und die Verteilung im Holz besser erkennen zu können, wurde bei einer kleinen Auswahl der Tränkungen ein roter Farbstoff zugemischt (Abb. 107).

⁵⁷ UNGER, A.; SCHNIEWIND, A. P.; UNGER, W.: *Conservation of Wood Artefacts*, Berlin, Heidelberg, New York 2001



Abb. 105: Blasenbildung des Degalans P28 auf der Oberfläche

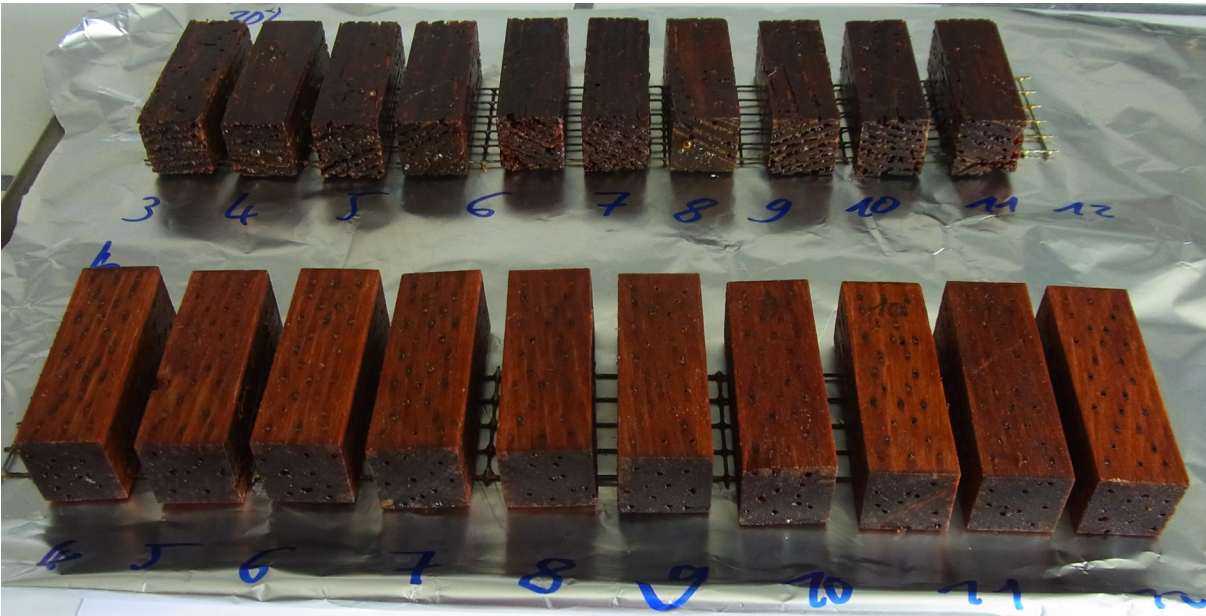


Abb. 106: Abdampfen des Lösemittels aus den Probekörpern nach der Tränkung im Abzug

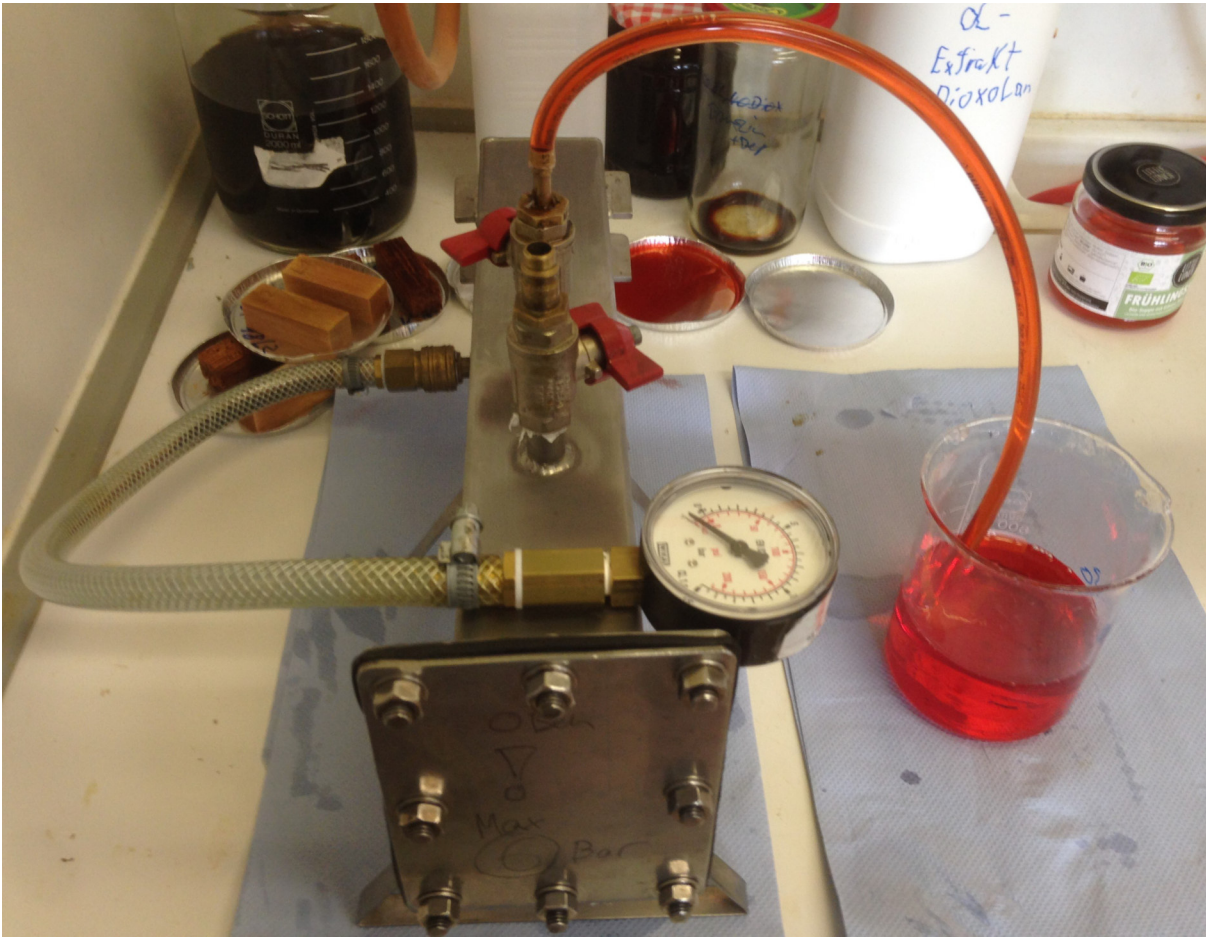


Abb. 107: Einsaugen des eingefärbten Degalans P28 in den Laborautoklav

Eine Versuchsreihe bestand aus jeweils 12 Probekörpern. Es wurden 6 Versuchsreihen getränkt:

Linde künstlich degradiert

Linde künstlich degradiert + 30% verölt

Linde künstlich degradiert + 10% verölt

Kiefer natürlich degradiert

Kiefer natürlich degradiert + 30% verölt

Kiefer natürlich degradiert + 10% verölt

3.5.2 Makroskopische Erfolgskontrolle

Die Rohdichte der Holzproben ist durch die Acrylharztränkung gestiegen. Tabelle 18 zeigt die durchschnittlichen Dichtewerte aller Tränkungskombinationen. Es ist erkennbar, dass die Dichtezunahme umso geringer ist je mehr Restölanteil im Holz enthalten ist. Bei einem großen Ölgehalt ist die Aufnahme an Festigungsmittel entsprechend gering, was die Festigungswirkung vermutlich stark einschränkt.

3

	Kiefer degradiert	Linde degradiert
unbehandelt	510 kg/ m ³	540 kg/ m ³
gefestigt	700 kg/ m ³	730 kg/ m ³
Ölgehalt 10 %	570 kg/ m ³	580 kg/ m ³
gefestigt, bei Ölgehalt 10 %	760 kg/ m ³	770 kg/ m ³
Ölgehalt 30 %	720 kg/ m ³	780 kg/ m ³
gefestigt, bei Ölgehalt 30 %	880 kg/ m ³	880 kg/ m ³

Tab. 18: Durchschnittliche Rohdichtewerte der Proben vor und nach der Festigung

Dem Tränkmittel wurde exemplarisch ein roter Farbstoff beigemischt (Abb. 108). In Abbildung 109 zeigen die Prüfkörper mit verschiedenen Restölanteilen und dem eingebrachten Festigungsmittel. Je mehr Restölanteil im Holz vorhanden ist, desto dunkler erscheinen die Prüfkörper nach der Acrylharzfestigung.

Abbildung 110 zeigt das Tränkergebnis jeweils einer Versuchsreihe von Kiefern- und Lindenholz. Die Probekörper sind aufgespalten und zeigen eine homogene Verteilung des Tränkmittels durch die Zugabe des roten Farbstoffes. Zudem zeigt sich eine deutliche Fixierung des Bohrmehls (Abb. 111) sowie eine glänzende Oberfläche.

Auf der Oberfläche bilden sich während der Trocknung starke Glanzbereiche und Tropfen, welche in der Praxis begleitend nachbehandelt werden müssen (Abb. 112).



Abb. 108: Gefestigte Prüfkörper mit und ohne Farbstoff im Festigungsmittel (li. Linde, re. Kiefer)



Abb. 109: Gefestigte Prüfkörper ohne Öl, mit 10% Öl, mit 30% Öl



Abb. 110: Versuchsreihe aufgespaltener Probekörper: Unbehandelt, mit Degalan, mit Degalan und 10% Öl, mit Degalan und 30% Öl



Abb. 111: Degalan und 30% Öl in Linde und Kiefer

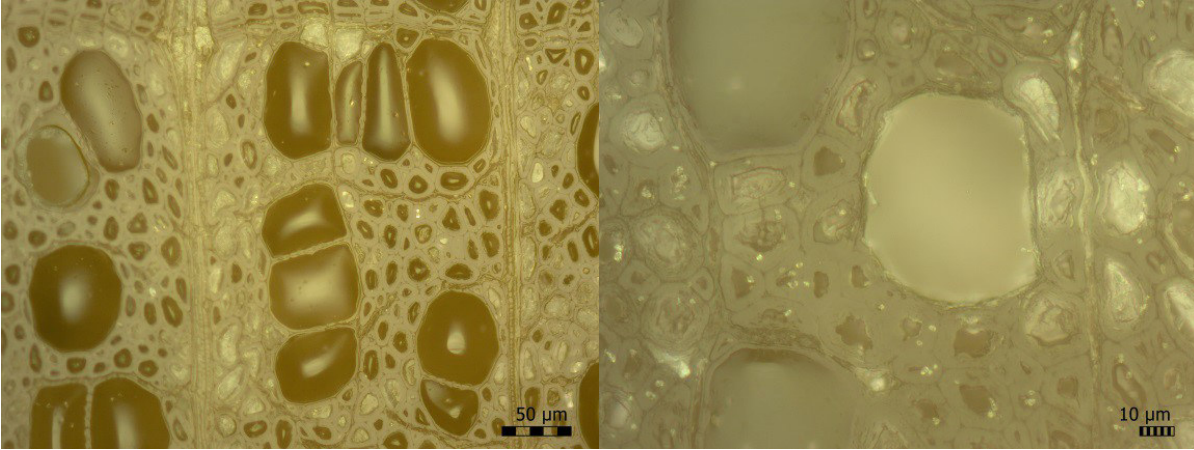


Abb. 112: Überschüssiges Festigungsmittel auf der Oberfläche eines Prüfkörpers

3.5.3 Mikroskopische Erfolgskontrolle

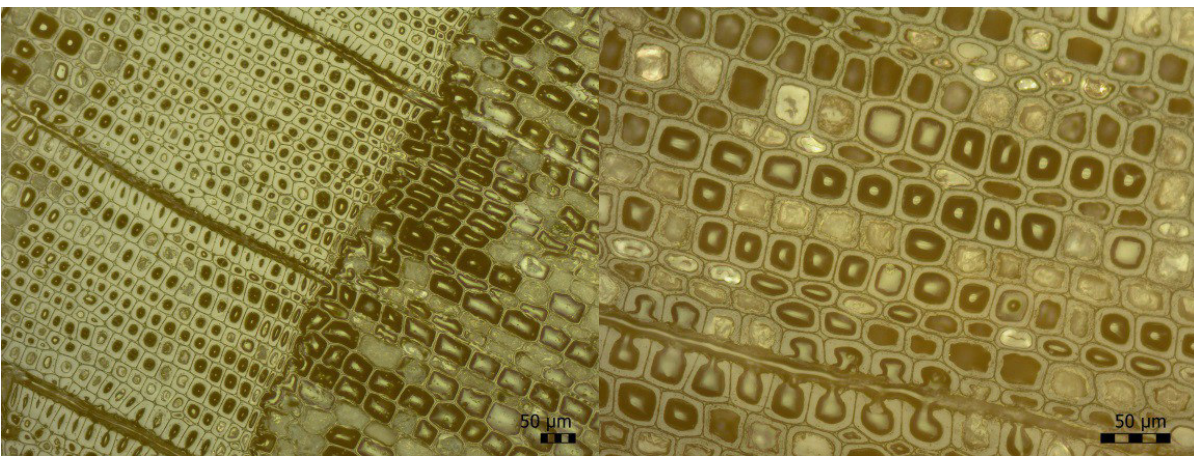
Zum mikroskopischen Vergleich von nativem und gefestigtem Holz wurden jeweils Querschliffe von unbehandelten und mit Degalan getränkten Holzproben im Auflicht unter Verwendung von VIS- und UV-Licht betrachtet. Eine Auswahl der Mikroskopiebilder findet sich in Abbildung 113.

Die Mikroskopiebilder zeigen holzanatomische Veränderungen durch das Einbringen des Festigungsmittels. Die Zellwände der getränkten Proben sind etwas verdickt, die Zelllumen sind teilweise mit Festigungsmittel gefüllt. Genauere Aussagen sind den Mikroskopiebilder nur schwer zu entnehmen, da das in das Holz eingedrungene Degalan auf diese Weise nur schlecht sichtbar gemacht werden konnte.



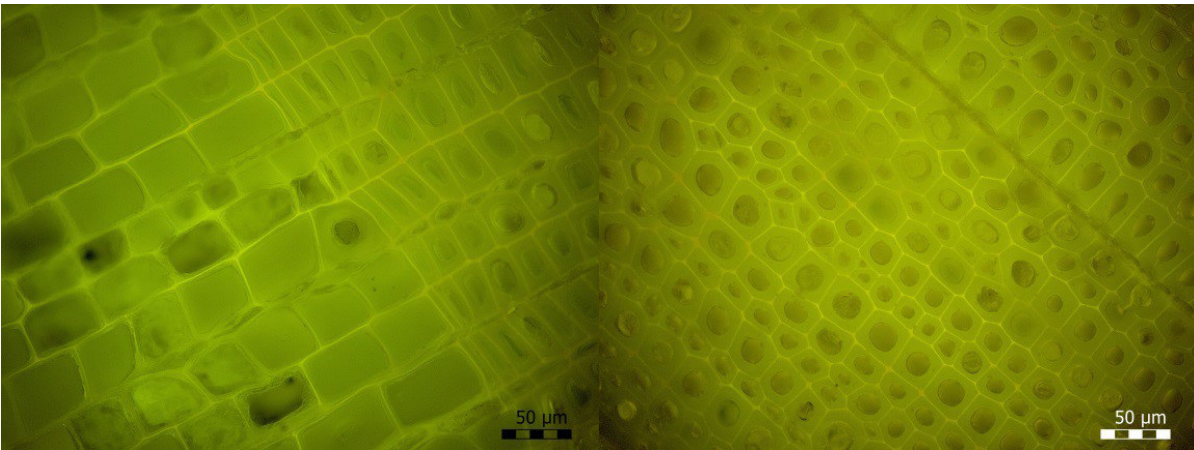
(a) Linde nativ, Q, x200 vergrößert

(b) Linde gefestigt, Q, x500 vergrößert



(c) Kiefer nativ, Q, x100 vergrößert

(d) Kiefer gefestigt, Q, x200 vergrößert



(e) Kiefer nativ, Q, x200 vergrößert, UV-Licht

(f) Kiefer gefestigt, Q, x200 vergrößert, UV-Licht

Abb. 113: Lichtmikroskopiebilder

3.6 Bestimmung physikalisch-mechanischer Eigenschaftskennwerte

3.6.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsprüfung findet in Anlehnung an DIN 52185 parallel zur Faser an der Universalprüfmaschine „TIRA test 28100“ 265 des Instituts für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden statt. Als Prüfplatten werden zwei Stahlplatten eingesetzt. Die untere Prüfplatte ist fest und auch die obere, eigentlich flexible Prüfplatte, muss durch einen Feststerring arretiert werden, weil die degradierten Prüfkörper ungleichmäßig geschädigt sind und in Vorversuchen ein Abkippen der oberen (flexibel gelagerten) Prüfplatte zu beobachten war. Die Holzprobe wird mittig, mit dem Faserverlauf senkrecht zu den Prüfplatten, positioniert.

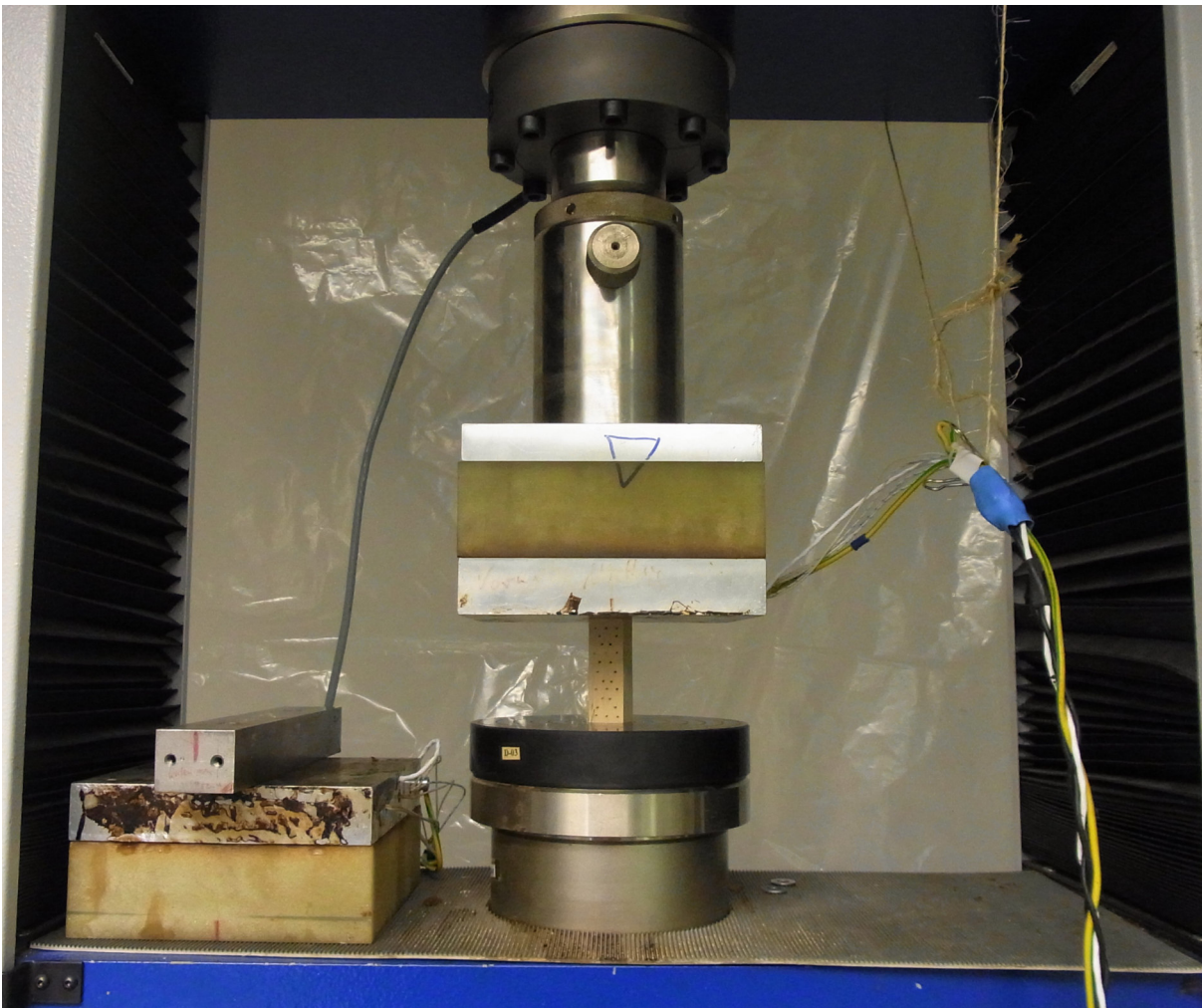


Abb. 114: Universalprüfmaschine tira test 28100

Parallel zur Faser wird nach DIN 52 185 geprüft. Der Probekörper wird belastet bis das Holz nachgibt und damit verbunden das Versuchsabbruchkriterium, ein Kraftabfall von 5%, eingetreten ist.

Quer zur Faser wird nach DIN 52 192 geprüft. Es wird in radialer Beanspruchungsrichtung geprüft, um die Verdichtung der Zellen besser vergleichen zu können. Der Versuch endet, wenn eine Stauchung von 20% erreicht ist, da in radialer Belastungsrichtung ein Versagen des Frühholzes zum starken Zusammendrücken führt und kein eigentlicher Bruch entsteht.

Die Probe wird mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min angefahren bis 100 N auf der Probe lasten. Danach wird mit 5 mm/min geprüft. Die Prüfung endet, wenn eine Stauchung der Probe um 20 % eintritt.

Aus der gemessenen Höchstkraft (F_{max}) in Newton, bezogen auf die belastete Querschnittsfläche der Probe vor Beginn des Druckversuchs (A) in mm² wird die Druckfestigkeit (σ_{DII}) der einzelnen Prüfkörper berechnet:

$$\sigma_{DII} = \frac{F_{max}}{A}$$

Die Erhöhung der Druckfestigkeit durch das Epoxidharz wird auf Basis der Überlegungen des „Zwillingsversuches“ berechnet, indem die Druckfestigkeit des degradierten Zwillings- prüfkörpers von der Druckfestigkeit des konsolidierten subtrahiert wird und mit der Druckfestigkeit nativer Kiefer verglichen.

Da aus den degradierten Proben während der Prüfung viel Nagsel austritt, wird auf eine in der DIN 52185 geforderte Bestimmung der Holzfeuchte durch Darrtrocknung verzichtet.

Getestet wurden folgende Versuchsreihen, jeweils mit natürlich degradierter Kiefer und künstlich degradierter Linde:

unbehandelt

Ölgehalt 10%

Ölgehalt 30%

Degalan

Degalan + Ölgehalt 10%

Degalan + Ölgehalt 30%

Zusätzlich wurde native Linde unbehandelt und 30% verölt getestet. Aus den gemessenen Werten der Maximalkräfte sowie der jeweils belasteten Fläche kann die Druckfestigkeit sowie das Elastizitätsmodul errechnet werden.

3.6.2 Differentielle Quellung /ASE

Wie bereits Cuany et al. feststellen, können Konsolidierungen die Sorptions- sowie Quell- und Schwindcharakteristika von Nadelholz ändern.⁵⁸ Dies kann im behandelten Objekt zwischen nativen, degradierten und konsolidierten Bereichen zu Spannungen durch abweichendes Verhalten führen, was Rissbildung und partielle Ablösung von gefestigten Zonen zur Folge haben könnte.

Deshalb untersucht dieser Versuch nach DIN 52 184 „Prüfung von Holz – Bestimmung der Quellung und Schwindung“, diesen Punkt. Für eine gesicherte Aussage für die longitudinale Richtung sind aufgrund des geringen Quell- und Schwindverhaltens Prüfkörper mit einer Länge in Faserrichtung von 100 mm notwendig.⁵⁹ Da in diesen Dimensionen kein degradiertes Probenholz mit katenparalleler Jahrringorientierung zur Verfügung steht und das native schwerlich über diese Länge vollständig tränkbar wäre, wird sich auf die Untersuchung des tangentialen und radialen Quell- und Schwindverhaltens konzentriert.

⁵⁸ CUANY et al. 1989.

⁵⁹ DIN 52 184, S. 3.

Die Versuche fanden in Anlehnung an DIN 52 184 an den unbehandelten und bereits konsolidierten Prüfkörpern aus statt. Es stehen 8 degradierte und 10 degradiert-konsolidierte Proben zur Verfügung. Von den nativen Prüfkörper sind jeweils 10 konsolidierte und 10 unbehandelt. Abbildung 115 zeigt jeweils ein Exemplar der untersuchten Prüfkörpertypen.

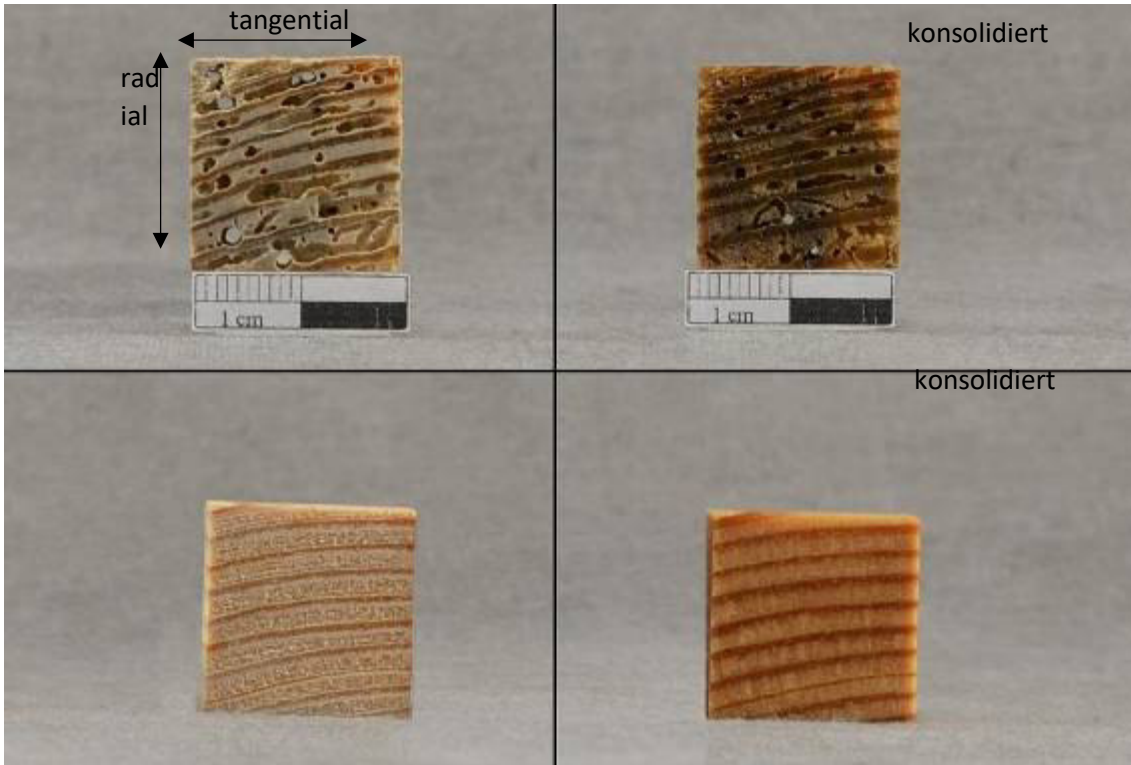


Abb. 115: unbehandelte und mit Degalan konsolidierte Prüfkörper

Nach der Aushärtungsphase von 27 Tage werden die Holzproben zuerst eine Woche bei Normalklima gelagert, um sie anschließend in der Klimaprüfkammer „Feutron KPK 400“ zu platzieren. Dort lagern sie, für jeweils zwei Wochen bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands, zuerst erneut im Normalklima (20 °C, 65 % relative Luftfeuchte), dann im Feuchtklima (20 °C, 85 % relative Luftfeuchte) und schließlich im Trockenklima (20 °C, 35 % relative Luftfeuchte). Eine längere Lagerungszeit war aufgrund des Belegungsplans der Klimaprüfkammer nicht möglich. Abschließend werden die Prüfkörper für 7 Tage bei 60 °C darrgetrocknet, um das Festigungsmittel nicht durch hohe Trocknungstemperaturen beispielsweise plastisch zu verformen.

Das Gewicht der Prüfkörper wird in jeder Klimastufe nach Erreichen der Massenkonstanz mit einer Feinwaage⁶⁰ auf 0,01 g ermittelt und die Dimensionen der Prüfkörper in radialer und tangentialer Richtung mit einem geeichten Messschieber⁶¹ auf 0,01 mm erfasst.

⁶⁰ Gewicht erfasst mit Feinwaage „Satorius L 420 S“ (bis 420 g), WA-04. Letzte Prüfung 2020-03.

⁶¹ Messschieber „Mitutoyo ABSOLUTE DIGIMATIC 150 mm“. Letzte Prüfung 2018-10.

Um das Sorptionsverhalten der Proben zu beurteilt, also eine Aussage zum absoluten Wasseranteil im Prüfkörper zu treffen, wird das Darrgewicht der Probe von der Masse in der jeweiligen Klimastufe subtrahiert.

Zusätzlich wird die Holzfeuchte ω [%] nach dieser Formel berechnet:⁶²

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100$$

m_1 = Masse des Prüfkörpers vor dem Trocknen [g]

m_0 = Masse des Prüfkörpers im darrtrockenen Zustand [g]

Weiterhin wird die differentielle Quellung q in radialer und tangentialer Richtung errechnet. Dieser Faktor beschreibt die prozentuale Maßänderung des Holzes in der jeweiligen holzanatomischen Richtung je 1 % Holzfeuchtigkeitsänderung im untersuchten Bereich von 35 bis 85 % relativer Luftfeuchte⁶³:

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 * (u_F - u_T)} * 100 \text{ in \%/\%}$$

l_F = Maß des Holzes im Feuchtklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes

l_T = Maß des Holzes im Trockenklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes

l_0 = Maß des Holzes im darrgetrockneten Zustand

u_F = Feuchtigkeitsgehalt des Holzes im Feuchtklima

u_T = Feuchtigkeitsgehalt des Holzes im Trockenklima

Um zusätzlich zu untersuchen, ob das Holz im trockeneren Klima, also zwischen 35 % und 65 % relativer Luftfeuchte, anders quillt und schwindet als zwischen 65 und 85 % relativer Luftfeuchte, wird zusätzlich die differentielle Quellung in den genannten Bereichen separat errechnet.

Holzkonsolidierungsmittel beeinflussen häufig die Wasseraufnahme im Vergleich zu unbehandelten referenzproben. Ein Maß dafür ist die sogenannte AntiSwelling Efficiency, die aus der mittleren maximalen Quellung der behandelten Probe und der der Referenzprobe errechnet werden kann. Je höher der ASE-Wert ist, umso hydrophober und Quellungsunanfälliger ist das modifizierte oder behandelte Holz.

$$a_{\max} \text{ (rad oder tan)} = (l_w - l_0 \text{ darr}) / l_0 \text{ darr} * 100\%$$

$$a_{\text{mean}} = (a_{\text{rad}} - a_{\text{tan}}) / 2$$

$$\text{ASE} = (a_{\text{mean ref}} - a_{\text{mean sample}}) / a_{\text{mean ref}} * 100\%$$

⁶² DIN EN 13183-1, Abschnitt 6.

⁶³ DIN 52 184, Abschnitt 3.6.

3.6.3 Extrahierbarkeit organischer Verbindungen mit und ohne Klimabeanspruchung

Um festzustellen, ob sich nach Einfluss größerer Temperatur- und Feuchteschwankungen Veränderungen am Festigungsmittel ergeben bzw. den Anteil an organisch mobilisierbaren Verbindungen zur Bewertung des Festigungserfolges heranziehen zu können, wurde ein klassischer Acetonauszug an gefestigten und ungefestigten Prüfkörpern mit und ohne Lagerung in einem Wechselklima hergestellt und die Differenz der Massen vor und nach der Extraktion zur Beurteilung herangezogen. Um eine bessere Vergleichbarkeit auch hinsichtlich des Abbaugrades der Holzsubstanz und des Gehaltes an Festigungsmittel zu gewährleisten, wurden Prüfkörper der Abmessungen 20 mm x 20 mm x 50 mm mittig geteilt und die jeweiligen Oberseiten im Normklima (20°C / 65% relative Luftfeuchte)- und die Unterseiten im Wechselklima gelagert.

Die Lagerung erfolgte jeweils 14 Tage bei einer Klimastufe.

1. Kaltlagerung im Kühlschrank bei 5°C
2. Warmlagerung 3h bei 60°C
3. Wiederholung 1 und 2 zweimal

Zur Ermittlung des Extraktgehaltes wurden ca. 5 g der jeweiligen Proben in einer Büchi-Apparatur mit 100 ml Aceton am Rückfluss für 2 Stunden extrahiert und die Flüssigphase anschließend in einen Rotationsverdampfer gegeben. Der Rückstand im Kolben wurde über Nacht im Abzug abdunsten gelassen und anschließend ca. 24h im Trockenschrank bei 80°C getrocknet und gewogen.

Zusätzlich wurde der feste Rückstand des Extraktes nach Abdunsten des Extraktionsmittels im Rotationsverdampfer ebenfalls rückgewogen.

3.6.4 Mikroskopische Untersuchungen nach Klimabeanspruchung

Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, ob größere Klimaschwankungen einen Einfluss auf die morphologische Stabilität der gefestigten Proben haben und gegebenenfalls zu Erweichungen, oder aber auch zu Versprödung führen können. So ist bekannt, dass Epoxidharze mit der Zeit schrumpfen und es zu Dimensionsänderungen kommen kann, die dann möglicherweise zu Rissen führen.

Daher wurden vergleichende mikroskopische Untersuchungen an den Schnittstellen der oberen und unteren Prüfkörper (12 Varianten), die nach der Verfestigung unterschiedlich gelagert wurden vorgenommen und das Ergebnis anhand von Fotos dokumentiert.

Die Prüfkörper wurden nach der Verfestigung geteilt; Prüfkörperabmessungen (nach Teilung): 20 mm x 20 mm x 30 mm. Der jeweils obere Teil wurde im Normklima gelagert, der untere Teil im Wechselklima (1. Kaltlagerung im Kühlschrank bei 5°C und 2. Warmlagerung 3 h bei 60°C; Wiederholung 1. und 2.).

Prüfkörper:

Durch den Gewöhnlichen Nagekäfer (*Anobium punctatum*) geschädigte Kiefernholzproben mit künstlich versehenen Restölanteil (Extrakt) konsolidiert mit Degalan (P2 bis P6) bzw. ELO (P8, P10, P12). Die verschiedenen Prüfkörpervarianten sind in Tabelle 19 aufgezeigt.



Abb. 116: 12 Varianten mit insgesamt 22 mittig quer aufgetrennten Prüfkörper

PK-Nr.	Stoffliche Zusammensetzung	Varianten	
		oberer Prüfkörper	unterer Prüfkörper
P1	Kiefer unbehandelt	1o, 2o, 3o	1u, 2u, 3u
P2	Kiefer 10 % Öl	1o, 2o, 8o	1u, 2u, 8u
P3	Kiefer 30 % Öl	4o, 7o	4u, 7u
P4	Kiefer natur + Degalan	2o, 3o, 6o	2u, 3u, 6u
P5	Kiefer 10 % Öl + Degalan	3o, 7o, 8o	3u, 7u, 8u
P6	Kiefer 30 % Öl + Degalan	3o, 6o	3u, 6u
P7	Kiefer unbehandelt	5o	5u
P8	Kiefer natur mit ELO getränkt	4o	4u
P9	Kiefer 10 % Öl	5o	5u
P10	Kiefer 10 % Öl, mit ELO getränkt	4o	4u
P11	Kiefer 30 % Öl	5o	5u
P12	Kiefer 30 % Öl, mit ELO getränkt	4o	4u

Tab. 19: Untersuchungsmaterial; Prüfkörper (PK) und Varianten (V)

Jeweils an der Schnittstelle der quer aufgetrennten Prüfkörper wurden die beiden Querschnitte des oberen und unteren Prüfkörpers vergleichend mikroskopisch bzgl. Ausschwitzungen an Öl bzw. Verfestigungsmittel untersucht. Die Untersuchungen wurden mit dem Auflichtmikroskop SMZ 1500 der Firma Nikon, bei Vergrößerungen von 7,5- bis 100fach durchgeführt. Über die entsprechende Kopplung mit der digitalen Mikroskop-Kamera Fi3 der Firma Nikon wurden Fotos erstellt. Die Ergebnisse gehen insbesondere aus den Mikrofotos und den Bildunterschriften hervor. Von jedem PK und jeder Variante wurde zumindest ein Übersichtsfoto (M 7,5:1) angefertigt, wo auf der linken Bildhälfte die Schnittstelle oberer PK (nach Lagerung im Normalklima) und auf der rechten Bildhälfte die Schnittstelle unterer PK (nach Lagerung im Wechselklima) angeordnet sind. Wenn Veränderungen der Oberfläche, z.B. durch Ölaustritt zu erkennen waren, wurden weitere Fotos bei stärkeren Vergrößerungen (50-fach oder 90-fach oder 100-fach) angefertigt.

4. Ergebnisse – Eigenschaften des konsolidierten Holzes

4.1 Beladungsgrad und Rohdichte

Die folgenden 2 Tabellen zeigen Prüfsets mit zwei Festigungsmitteln, Degalan und epoxidiertes Leinöl (ELO). Daraus geht deutlich hervor, dass bereits die Vortränkung mit den gealterten Ölextrakten (P2,P3, P9,P11) zu einer erheblichen Steigerung der Rohdichten führt, die sich bei einem Extraktgehalt von 30% nicht mehr wesentlich durch den Degalanzusatz steigern lassen. So beträgt der Unterschied im Beladungsgrad der Proben P3 und P6 nur 82 kg/m³. In eine Probe mit nur 10% Ölanteil lassen sich dagegen noch 215 kg/m³ Festigungsmittel einbringen. Die maximal mit Degalan zu erreichende Rohdichte liegt bei ca. 0,9 kg/m³, wobei hier der Ölanteil den größten Beitrag liefert. Die nur mit Degalan behandelte nicht verölte Probe hat eine Rohdichte von 0,69 kg/m³.

Bei der Verwendung von epoxidiertem Leinöl lassen sich die erzielten Rohdichten final auf 1,06 kg/m³ steigern, wobei es hier keinen Unterschied macht, wieviel Altöl vorgelegt wurde. Hier kommt es in jedem Fall zu einer Volltränkung mit einer Beladung zwischen 550 bis 590 kg/m³.

		Dichte n.T. [g/cm ³]	STABW	Beladung [kg/m ³]	STABW
P1	Kiefer natur	0,51	0,02	0	0,0
P2	Kiefer 10% Öl	0,58	0,03	79	7,2
P3	Kiefer 30% Öl	0,72	0,02	313	19,2
P4	Kiefer, Degalan	0,69	0,07	207	42,2
P5	Kiefer, Degalan+10% Oel	0,77	0,05	294	34,7
P6	Kiefer, Degalan+30% Oel	0,87	0,03	395	28,1

Tab. 20: Beladung und Rohdichte ölgetränkter Kiefer + Festigungsmittel Degalan

		Dichte n.T. [g/cm ³]	STABW	Beladung [kg/m ³]	STABW
P7	Kiefer natur	0,52	0,01	0	0,0
P8	Kiefer natur mit ELO getränkt	1,01	0,06	533	41,3
P9	Kiefer 10% Öl	0,61	0,03	90	7,5
P10	Kiefer 10% Öl, nicht gestaucht mit ELO getränkt	1,06	0,02	4561	15,2
P11	Kiefer 30% Öl	0,81	0,02	368	24,4
P12	Kiefer 30% Öl mit ELO getränkt	1,06	0,04	277 2	30,2

Tab. 21: Beladung und Rohdichte ölgetränkter Kiefer + Festigungsmittel epoxidiertes Leinöl (ELO)

¹ Beladung nur mit ELO, ohne vorgelegten Altölextrakt; Gesamtbeladung läge rechnerisch bei ca. 546 kg/m³

² Beladung nur mit ELO, ohne vorgelegten Altölextrakt; Gesamtbeladung läge rechnerisch bei ca. 590 kg/m³

So lässt sich auch an mikroskopischen Aufnahmen erkennen, dass bei einer Beladung mit 10% Ölextrakt Öl an den Schnittstellen des Prüfkörpers noch nicht austritt, während dieses bei 30% Ölextraktanteil leicht der Fall ist. Der Effekt verstärkt sich noch, wenn das Festigungsmittel Degalan dazukommt.



Abb. 117: Querschnitte P2 (10% Öl); M 7,5:1



Abb. 118: Querschnitte P3 (30% Öl); M 7,5:1

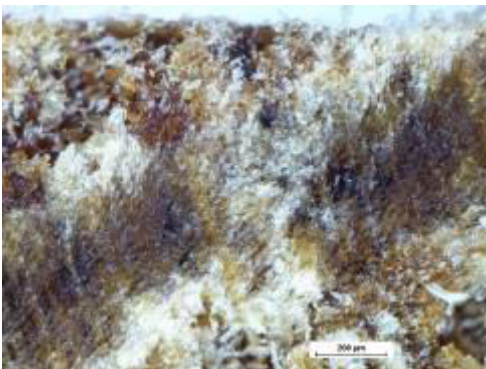


Abb. 119: Querschnitt P2 (10%) Öl in den Fasern erkennbar, nicht ausgetreten; M 90:1



Abb. 120: Querschnitt P3 (30%) Öl in den Fasern erkennbar, äußerst gering ausgetreten; M 100:1



Abb. 121: Querschnitt P5 Kiefer 10 % Öl + Degalan in den Fasern erkennbar, gering ausgetreten; M 100:1

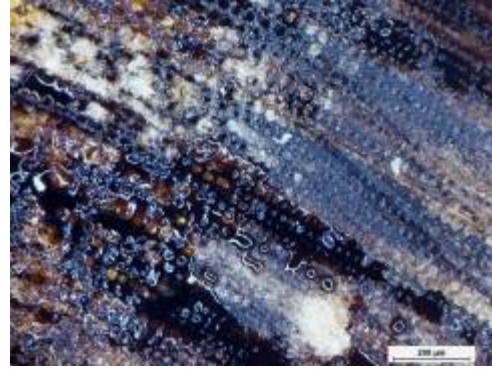


Abb. 122: Querschnitt P6 Kiefer 30 % Öl + Degalan Öl in den Fasern erkennbar, mittelstark ausgetreten; M 100:1

Im Fall des epoxidierten Leinöls kommt es ebenfalls zu einem stärkeren Ölaustritt, welcher auf eine unzureichende Härtung zurückzuführen ist. Hier wird derzeit an einem Prozess zur Strahlenhärtung gearbeitet, der bei weiterer Optimierung zu besseren Ergebnissen führen kann.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen den starken Ölaustritt aus einer Probe mit wenig (10%) Restölextrakt und schlechter Aushärtung im Vergleich zu einer mit höherem (30%) Restölgehalt und verbesserter Aushärtung.

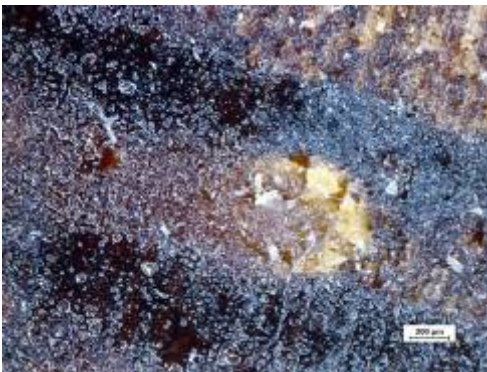


Abb. 123: Querschnitt P10 Kiefer 10 % Öl, mit ELO getränkt, Öl stark ausgetreten; M 100:1



Abb. 124: Querschnitt P10 Kiefer 10 % Öl, Öl in den Zellen erkennbar, gering ausgetreten M 100:1

4.2 Holzfeuchte

In Abbildung 125 sind die Holzfeuchten der preparierten Prüfkörper nach verschiedenen Klimalagerungen aufgezeigt. Grundlegend lässt sich bei sämtlichen Prüfkörpern, ob nun unbehandelt, mit Restöl versehen oder mit Restöl versehen und mit Festigungsmittel getränkt eine Aufnahme von Wasser durch die Lagerung in verschiedenen Luftfechtigkeiten feststellen. Die Sorption ist dabei aber abhängig vom Beladungsgrad der jeweiligen Mittel. Je höher der der Eintrag von Öl und Festigungsmittel führt dabei zu einer geringeren Wasseraufnahme.

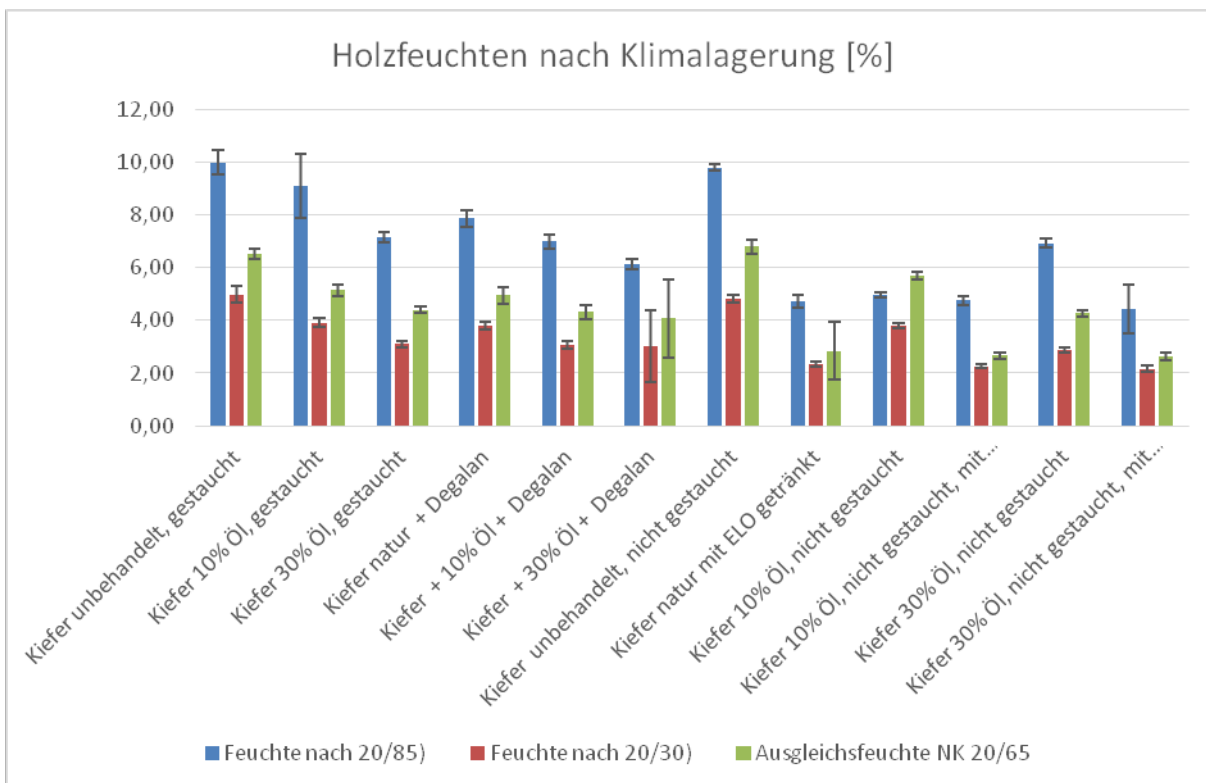


Abb.125: Holzfeuchte nach Klimalagerung

4.3 Differentielles Quellungsverhalten / ASE

Differentielle Quellung q ist das prozentuale Quellmaß des Holzes je 1% relative Luftfeuchteänderung im für die praktische Holzverwendung wichtigen relativen Luftfeuchtebereich. $q \tan$ ist das Maß des Holzes im Feuchtklima und $q \text{ rad}$ das Maß des Holzes im Trockenklima, jeweils nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes.

In Abbildung 126 ist das jeweilige Quellungsverhalten unbehandelter, mit Restöl versehener bzw. mit Degalan getränkter Prüfkörpern abgebildet sowie in Abbildung 127 mit epoxidieren Leinöl. Hierbei fällt die diffuse Datenlage auf. Ein eindeutiger Trend durch die unterschiedlichen Behandlungen der Prüfkörper ist nicht zu erkennen.

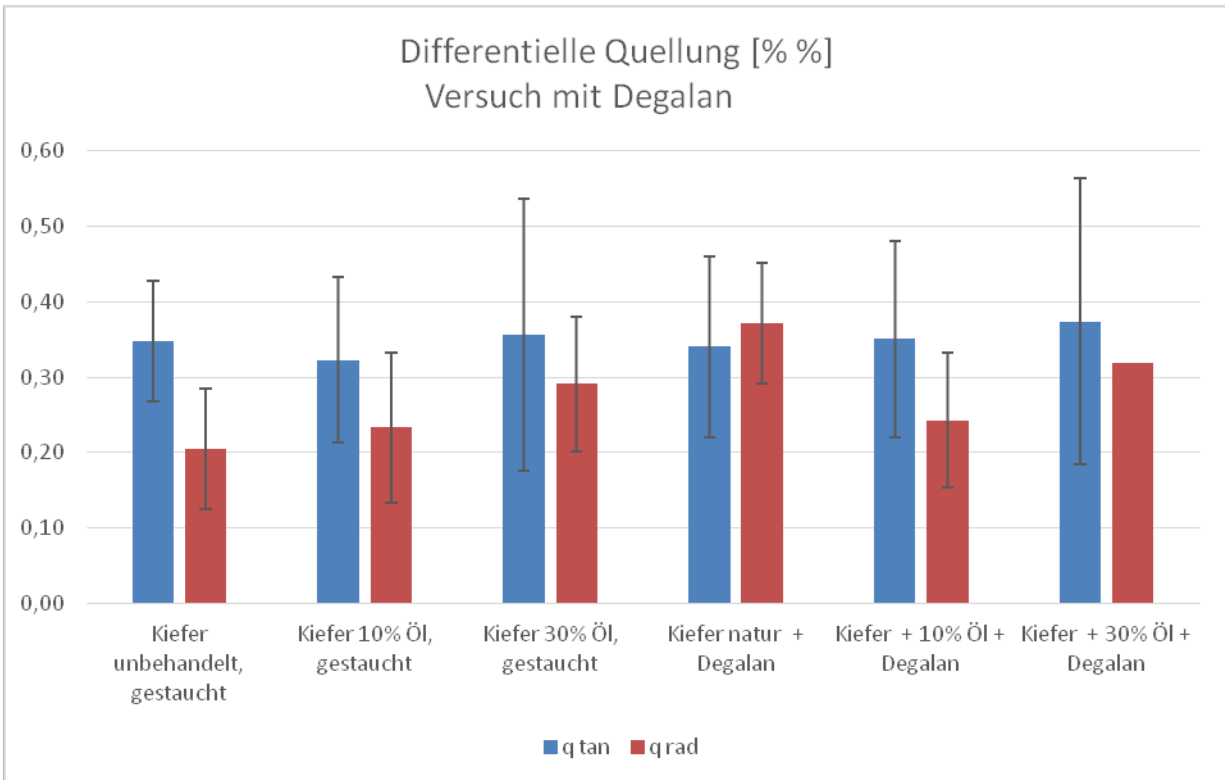


Abb. 126: Differenzielle Quellung mit Degalan getränkter Prüfkörper

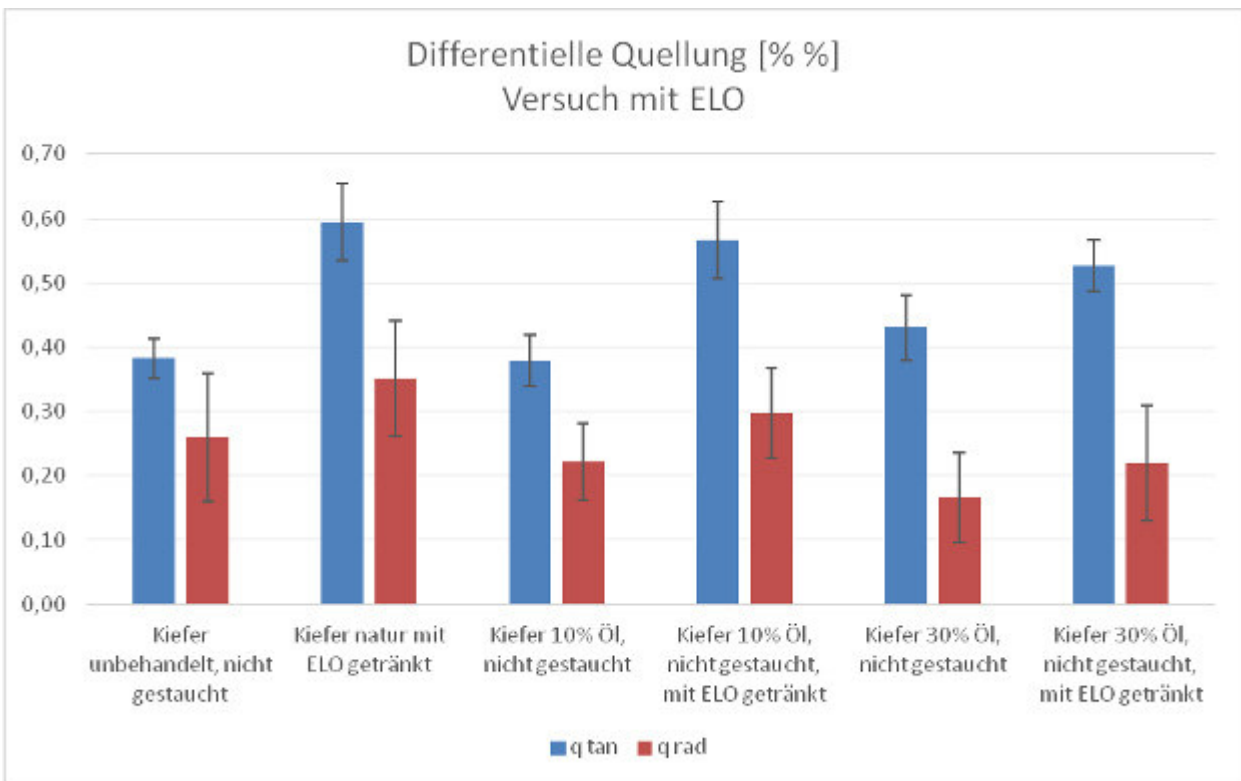


Abb. 127: Differenzielle Quellung mit epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper

4.4 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessung sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Da die Belastungsrichtung entscheidend ist, wurde sowohl parallel als auch senkrecht zur Faser (radiale Richtung) geprüft. Die Druckfestigkeit parallel zur Faser ist dabei deutlich größer als senkrecht zur Faser.

Beim Vergleich der degradierten mit der nativen Linde sieht man, dass durch die künstliche Degradierung die Druckfestigkeit deutlich verringert wurde und die Werte denen der natürlich degradierten Kiefer nahe kommen. Beim Vergleich mit Literaturwerten für Kiefernholz fällt auch hier auf, dass durch das Wirken der holzerstörenden Insekten die Festigkeit stark verringert ist.

Grundsätzlich zeigt sich, dass mit zunehmendem Ölgehalt die Rohdichte steigt. Die Dichte hat jedoch keinen linearen Zusammenhang mit der Druckfestigkeit. Die Bestimmung der Holzfeuchte ergab, dass die Holzfeuchte im Normklima mit zunehmendem Ölgehalt abnimmt. Die Feuchtwerte lassen sich direkt auf die Rohdichte übertragen, je größer die Rohdichte der Prüfkörper desto kleiner die Holzfeuchte. Das Holz nimmt während der Lagerung bei 65% relativer Luftfeuchte Wasser auf, das heißt Wassermoleküle lagern sich in die Zellwände ein. Es zeigt sich, dass Kiefer allgemein eine etwas höhere Holzfeuchte als Linde hat, was auf den höheren Glucomannan-Anteil im Nadelholz gegenüber Laubholz zurückzuführen ist. Außerdem ist zu bemerken, dass im Normklima die Holzfeuchte der getränkten Holzprüfkörper geringer ist als die der unbehandelten. Somit ist die Feuchtigkeitsaufnahme von mit Degalan getränktem Holz geringer als die von unbehandeltem Holz. Durch das Festigungsmittel bzw. Öl sind demnach Zellen für die Wasseraufnahme versperrt.

Die Werte zeigen Tendenzen der Festigkeitswerte auf. Dennoch sind die Werte kritisch zu betrachten, da es durch Dichteunterschiede, vor allem bei den natürlich degradierten Kiefernproben und Abweichungen in der Lage der anatomischen Richtungen der Holzproben zu großen Schwankungen der Ergebnisse kommen kann.

Die Mittelwerte aller Messwerte der Druckfestigkeitsprüfung parallel zur Faser sind in Tabelle 22 dargestellt. Abbildung 128 zeigt einen Vergleich der mittleren Druckfestigkeitswerte beider Holzarten im jeweiligen Tränkungszustand.

Bei beiden Holzarten nehmen die aufgewandten Maximalkräfte und damit die Festigkeitswerte durch das Vorhandensein des Öls ab. Bei der Linde werden die geringsten Festigkeitswerte bei einem 10%igen Ölgehalt erreicht, bei der Kiefer sind die Werte mit 30% Ölgehalt am geringsten. Die Spitzenwerte der Druckfestigkeit werden bei der Kiefer im unbehandelten Zustand erreicht, bei der Linde durch die Festigung mit Degalan P28. Die Festigung mit Degalan ändert die Werte kaum. Aufgrund der großen Streuung der Messergebnisse bei den Messungen parallel zur Faser, sind die Werte nicht sehr aussagefähig. Es liegen alle Druckfestigkeitswerte im ähnlichen Bereich und durch die große Standardabweichung auch in den Fehlergrenzen der jeweils anderen Messungen. Zu den deutlichen statistischen Messunsicherheiten kommen zusätzlich systematische Messfehler, wodurch die Ergebnisse von nur acht Messungen pro Versuchsreihe statistisch nicht ausreichend sind, um genaue Aussagen treffen zu können. Parallel zur Faser hat die Anatomie, beispielsweise der Faserverlauf, einen entscheidenden Einfluss auf den Versagenszeitpunkt der Probe, sodass Aussagen über den Effekt des Festigungsmittels nur in Ansätzen getroffen werden können.

	ρ [kg/m ³]	F_{max} [N]	σ [MPa]	E [MPa]	u [%]
Linde degradiert					
unbehandelt	545	10254,5	25,04	2961,9	8,47
10% Ölgehalt	575	8287,5	19,29	1944,2	7,73
30% Ölgehalt	778	10520,7	23,36	2461,1	5,83
Gefestigt	723	11628,0	27,76	3090,7	8,18
Gefestigt, 10% Ölgehalt	770	10910,1	24,98	2556,8	6,58
Gefestigt, 30% Ölgehalt	880	12453,5	26,89	2814,2	4,86
Vergleichswerte Linde nativ					
unbehandelt	591	21112,9	52,00	3676,0	8,47
30% Ölgehalt	794	22087,6	51,70	3896,8	5,55
Kiefer degradiert					
unbehandelt	510	13268,7	32,43	3240,7	10,14
10% Ölgehalt	572	11309,7	26,92	2797,0	8,93
30% Ölgehalt	717	10665,7	25,30	2824,3	6,93
Gefestigt	680	10226,7	24,68	2626,9	8,35
Gefestigt, 10% Ölgehalt	755	10974,1	25,89	2923,6	8,24
Gefestigt, 30% Ölgehalt	878	10686,7	25,33	2767,6	6,34

Tabelle 22: Mittelwerte parallel zur Faser

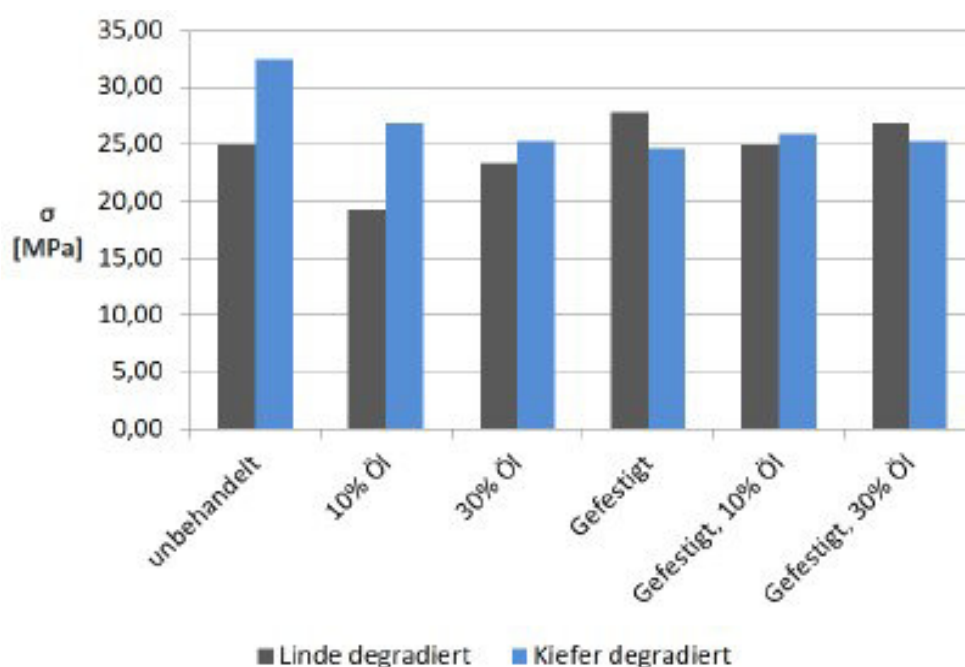


Abb. 128: Mittelwerte der Druckfestigkeiten parallel zur Faser

In Abbildung 129 sind exemplarisch drei Kurven von degradiertem Linde im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Es wird deutlich, dass die notwendige Maximalkraft bis zum Versagen der Holzprobe durch die Festigung mit Degalan P28 größer wird, was mit den oben gezeigten höheren Druckfestigkeiten einhergeht. Der Kurvenverlauf ist dabei ähnlich, zu Beginn der Messung lässt sich bei gleicher Kraft eine minimal größere Dehnung des mit Degalan behandelten Prüfkörpers feststellen. Im Diagramm deutlich sichtbar wird der Einfluss des Ölextraktes auf die Festigung. Die Kurve verläuft von Beginn an flacher. Der maximale Kraftbetrag kommt dem des reinen Festigungsmittels ähnlich, jedoch findet bis zum Versagen eine größere Dehnung statt. Der Ölgehalt führt demnach zur Verringerung des E-Moduls.

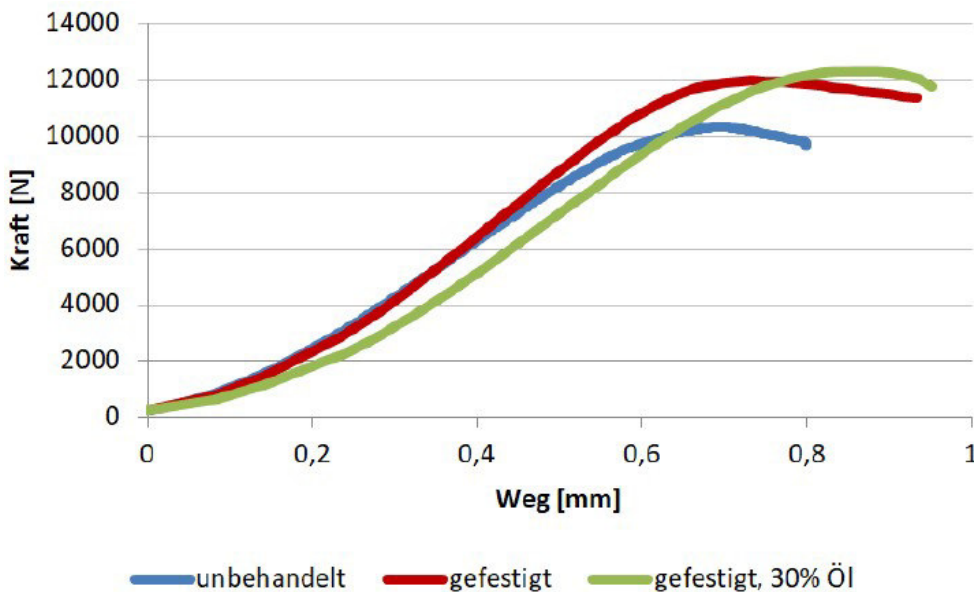


Abb. 129: Exemplarischer Vergleich dreier Kurven von degradiertem Linde, parallel zur Faser

Tabelle 23 umfasst die Mittelwerte aller Messwerte der Druckfestigkeitsprüfung quer zur Faser in radialer Richtung. Abbildung 130 zeigt erneut einen Vergleich der mittleren Druckfestigkeitswerte beider Holzarten im jeweiligen Tränkungsstatus, diesmal bei Prüfung senkrecht zur Faserrichtung.

Quer zur Faser ergeben sich aufgrund der geringen Standardabweichung deutlich aussagekräftigere Werte. Bei den Messungen fielen jedoch vereinzelte Werte sehr stark aus der Reihe, was auf Messunsicherheiten sowie auf Abweichungen des Faserverlaufs zurückzuführen sein könnte. Diese Werte wurden in den Mittelwertberechnungen nicht beachtet.

Die größten Druckfestigkeiten werden bei beiden Holzarten nach der Festigung mit Degalan ohne vorherigen Ölgehalt erreicht. Das zeigt, dass durch die Einlagerung des Festigungsmittels in die Zellen eine deutliche Stabilitätserhöhung, vor allem der Frühholzzone erreicht werden kann. Die Tränkungen steigern die Druckfestigkeit der Holzproben im Vergleich zum unbehandelten Zustand um 40-50%. Der Festigkeitszuwachs ist damit in dieser Richtung deutlich größer als parallel zum Faserverlauf.

Betrachtet man die degradierte Linde, wird die Druckfestigkeitserhöhung durch die Tränkung mit Degalan P28 besonders deutlich. Wird eine 10% verölzte Holzprobe gefestigt, verringern sich die Festigkeitswerte nur minimal. Ein Ölgehalt von 30% wirkt sich jedoch deutlich negativ auf die Festigkeitswerte aus. Die Festigkeit ist im Vergleich zur Festigung ohne Öleinfluss um ca. 40% gesenkt.

Bei der Kiefer zeigt sich durch das Degalan ein weniger deutlicher Anstieg der Festigkeit, was vermutlich auf die große Streuung der Dichtewerte zurückzuführen ist. Dennoch wird deutlich, dass das

Vorhandensein von Öl die Festigkeitswerte senkt. Bei 10% Ölgehalt werden die Werte bereits um ca. 15% verringert, bei steigendem Ölgehalt sinken die Werte jedoch anders als bei der Linde nicht weiter.

Da das E-Modul aus der Druckfestigkeit berechnet wird, zeigen die Ergebnisse die gleichen Tendenzen. Auffällig ist jedoch, dass quer zur Faser die Kombination aus Festigungsmittel und Öl das E-Modul deutlich verringert. Es lässt sich der Schluss ziehen, dass die chemische Wechselwirkung des Festigungsmittels mit dem Öl die Steifigkeit der Holzprobe herabsetzt.

	ρ [kg/m ³]	F_{max} [N]	σ [MPa]	E [MPa]	u [%]
Linde degradiert					
unbehandelt	533	7510,1	6,16	215,2	8,47
10% Ölgehalt	592	7973,7	6,36	172,9	7,73
30% Ölgehalt	774	8486,9	6,60	214,6	5,83
Gefestigt	741	11653,6	9,44	248,3	8,18
Gefestigt, 10% Ölgehalt	784	11817,3	9,36	199,4	6,58
Gefestigt, 30% Ölgehalt	879	7491,8	5,77	128,4	4,86
Vergleichswerte Linde nativ					
unbehandelt	605	14085,4	11,59	383,7	8,47
30% Ölgehalt	797	14006,1	11,20	294,5	5,55

Kiefer degradiert					
unbehandelt	516	5343,5	4,39	164,0	10,14
10% Ölgehalt	582	6178,0	4,98	162,5	8,93
30% Ölgehalt	731	5279,2	4,27	138,1	6,93
Gefestigt	731	7636,2	6,21	169,0	8,35
Gefestigt, 10% Ölgehalt	770	6423,6	5,18	113,9	8,24
Gefestigt, 30% Ölgehalt	894	7019,2	5,62	120,0	6,34

Tabelle 23: Mittelwerte quer zur Faser (radial)

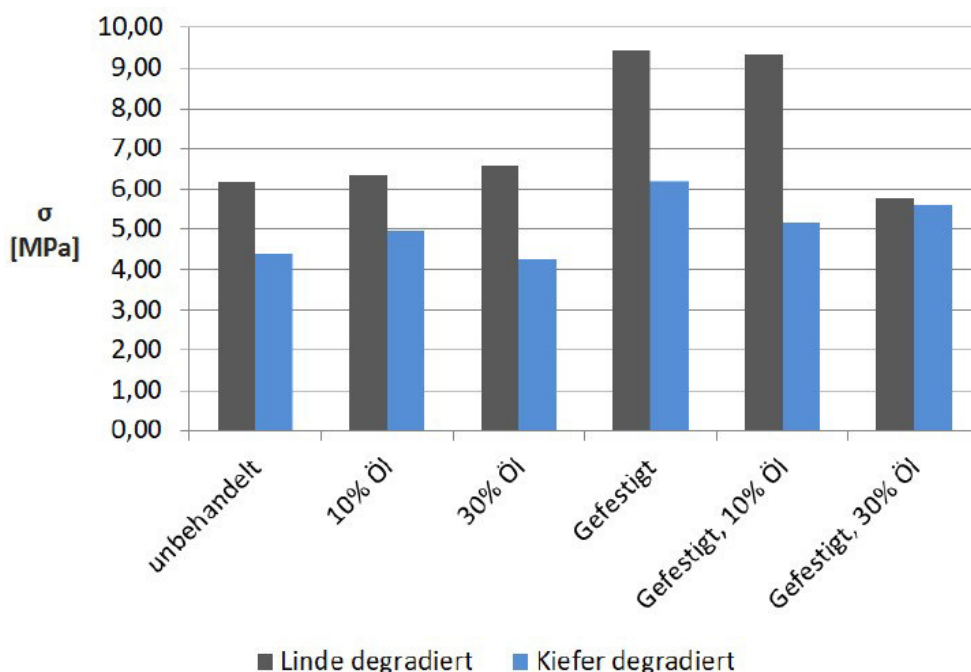


Abb. 130: Mittelwerte der Druckfestigkeiten quer zur Faser

In Abbildung 131 sind exemplarisch drei Kurven von radial geprüfter degradiert Kiefer im Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Geprüft wurde hier bis zur Stauchung um 20%. Es ist erkennbar, dass nach der Festigung mit Degalan P28 eine deutlich größere Kraft für die Stauchung aufgewendet werden muss. Auch hier findet ebenso wie parallel zur Faser im Anfangsbereich eine stärkere Dehnung des gefestigten Holzes statt. Der Einfluss des Öls äußert sich in geringeren Kräften für die Dehnung. Dennoch sind die Festigkeitswerte trotz Ölgehalt deutlich größer als die der unbehandelten Proben. Auch hier beeinflusst der Ölgehalt das E-Modul.

Aufgrund der geringen Probenanzahl und der großen Streuung der Messwerte können nur Tendenzen aufgezeigt werden. Der Probenumfang pro Testreihe ist laut DIN 52 180 zu gering für konkretere Aussagen.

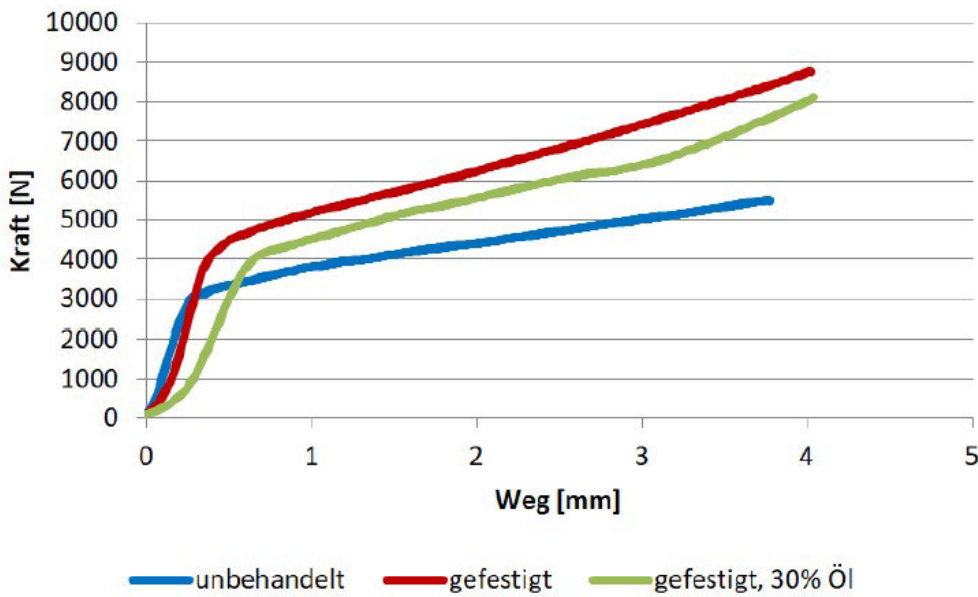


Abb. 131: Exemplarischer Vergleich dreier Kurven von degradiert Kiefer, quer zur Faser

Im Folgenden ist die Druckfestigkeit für neben der mit Degalan und der mit epoxidierten Leinöl gefestigten Prüfkörper dargestellt. Hierbei ist eine leichte Druckfestigkeitserhöhung der mit ELO gefestigten Prüfkörper mit Restölanteil gegenüber der mit Degalan getränkten erkennbar.

		F [N/mm ²]	STABW
P1	Kiefer natur	13269	3221
P2	Kiefer 10% Öl	11310	3012
P3	Kiefer 30% Öl	10666	2905
P4	Kiefer, Degalan	10227	3306
P5	Kiefer, Degalan+10% Oel	10974	1989
P6	Kiefer, Degalan+30% Oel	10687	3249

Tab. 24: Druckfestigkeiten mit Degalan getränkter Prüfkörper

		F [N/mm ²]	STABW
P7	Kiefer natur	12243	2013
P8	Kiefer natur mit ELO getränkt	8955,4	4569
P9	Kiefer 10% Öl	12790	2761
P10	Kiefer 10% Öl, nicht gestaucht mit ELO getränkt	12687,8	2215
P11	Kiefer 30% Öl	16055	4774
P12	Kiefer 30% Öl mit ELO getränkt	15091,2	4587

Tab. 25: Druckfestigkeiten mit epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper

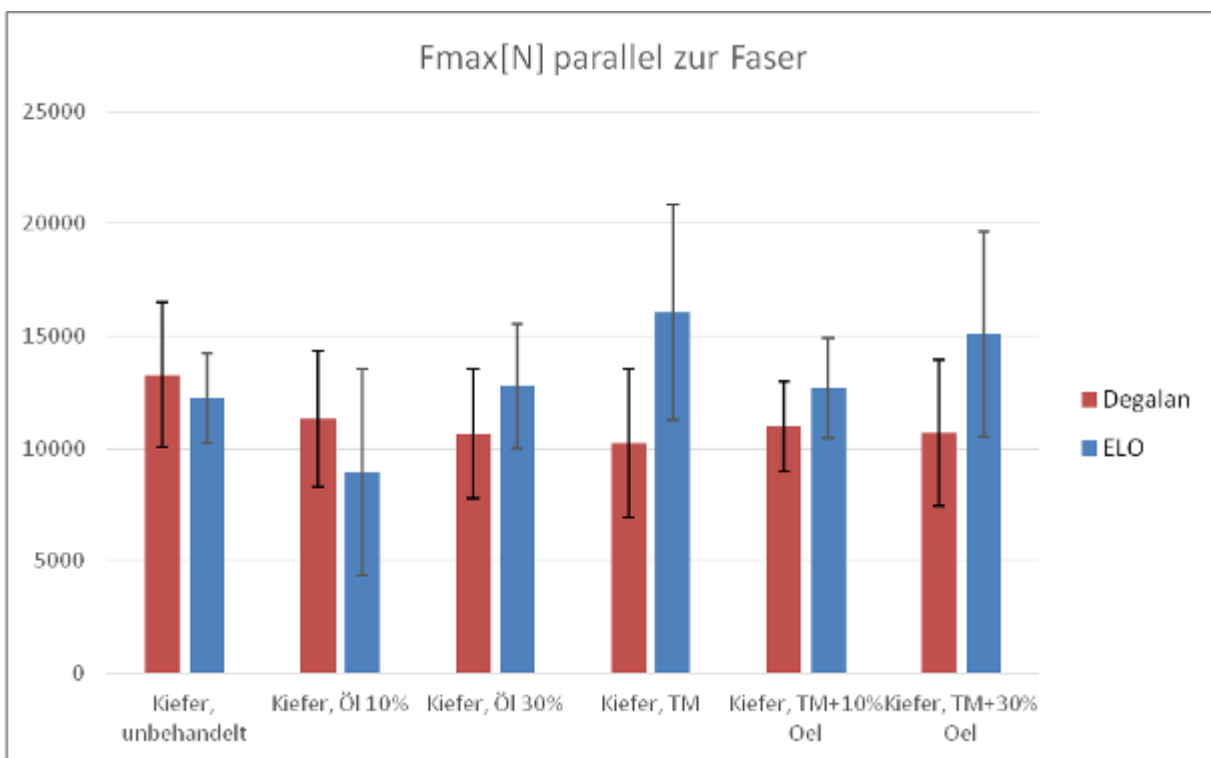


Abb. 132: Druckfestigkeiten parallel zur Faser Degalan und epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper

4.5 Eigenschaftsstabilität nach Klimabeanspruchung

4.5.1 Extrahierbarkeit organischer Verbindungen nach Acetonextraktion

Proben mit Degalan haben die größten Anteile an organisch extrahierbaren Substanzen. Der Anteil steigt mit steigendem Ölanteil in den Proben. Dabei ist es unerheblich, ob das Öl Restöl (Extrakt) oder zugesetztes epoxidiertes Leinöl ist. Der extrahierbare Anteil ist in gut ausgehärteten Proben mit ELO bei höherem Restölanteil besser als ohne ELO. Die Proben mit 10% Restöl und ohne Restöl waren nicht gut gehärtet. Der Einfluss des Wechselklimas auf den Anteil organisch extrahierbarer Substanzen ist zu vernachlässigen. Bei naturbelassener Kiefer ist er sogar niedriger. Bei allen anderen Proben liegen mögliche Abweichungen der Mittelwerte im Bereich der Streuung.

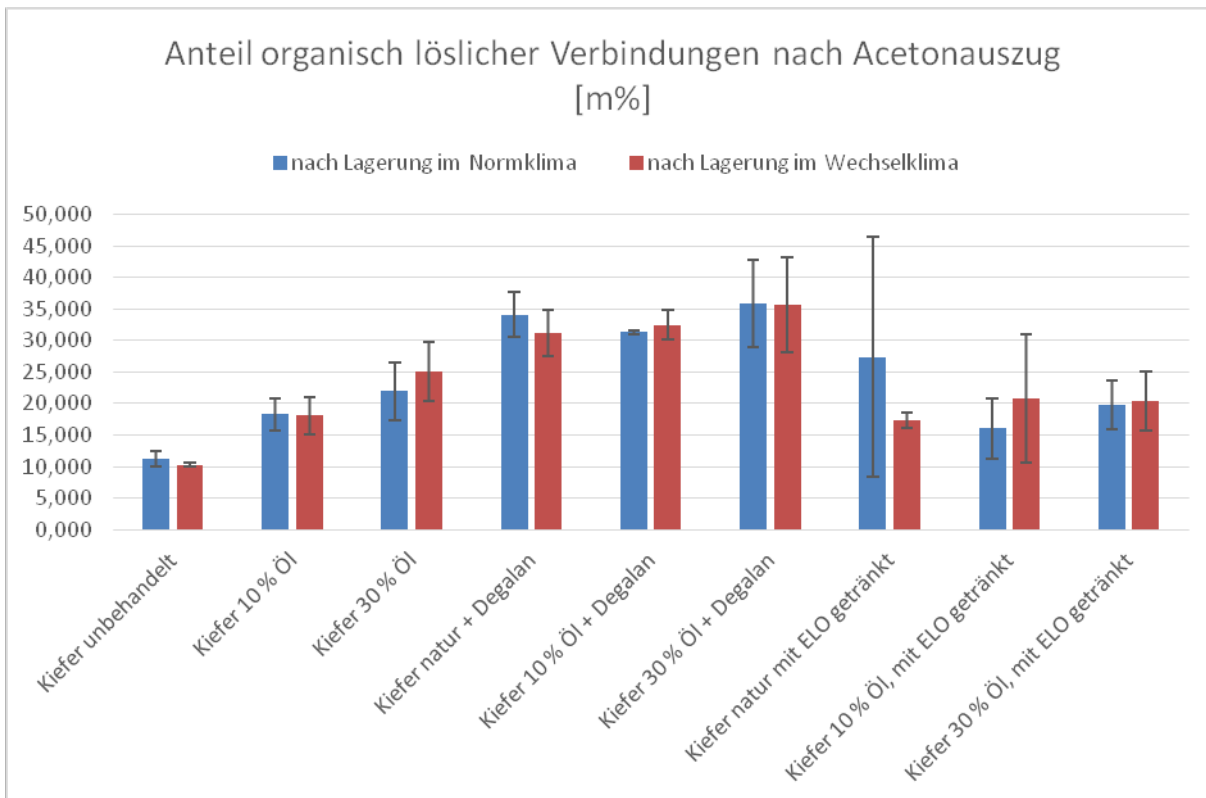


Abb. 133: Anteil organisch löslicher Verbindungen nach Acetonauszug im Normal- und Wechselklima

5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Das verwendete Acrylharz Degalan P28 ist ein seit Jahrzehnten in der Restaurierung verwendetes Festigungsmittel. Um sich für die Festigung verölter Kunstobjekte zu eignen, muss das gefestigte Material nach der Behandlung spezifischen denkmalpflegerischen Anforderungen genügen. Aus diesem Grund wurden mechanische Festigkeitseigenschaften untersucht. Die Volltränkung mittels modellhafter Vakuum-Druck-Tränkung führt zu guten Tränkergebnissen. Mittels Farbstoffzugabe und Aufspaltung der getrockneten Proben konnte eine vollständige Durchtränkung bestätigt werden. Durch den hohen Lösemittelanteil, der beim Aushärten entweicht, bleibt nur ein Teil des Festigungsmittels letztendlich im Holz. Dennoch können dadurch die Festigkeitswerte gesteigert werden.

Auch die exemplarisch getränkten Prüfkörper mit epoxidierten Leinöl zeigen eine erhöhte Festigkeit, wobei eine vollständige Polymerisierung nicht stattgefunden hat.

Die Festigkeitswerte zeigen die Veränderung der Materialeigenschaften durch den Ölgehalt sowie durch die Behandlung mit Festigungsmittel.

Durch die Tränkung wurde eine Dichtesteigerung verursacht. Allgemein wird die Druckfestigkeit durch die Tränkung mit Degalan P28 erhöht. Vor allem senkrecht zur Faserrichtung nehmen die Festigkeitswerte durch die Behandlung deutlich zu. Die Festigung vorher verölter Proben weist jedoch kleinere Werte auf. Quer zur Faser senkt ein Ölgehalt von 30% die Festigkeit durchschnittlich um 39% bei Lindenholz, bei Kiefer nimmt die Festigkeit nur um 10% ab. Das Öl wirkt sich dementsprechend negativ auf die Festigung aus. Parallel zu Faser lässt sich dieses Ergebnis jedoch nicht eindeutig bestätigen. Eine weitere Erkenntnis aus den Druckversuchen ist die Verringerung des E-Moduls durch das Vorhandensein von Restölanteilen im Holz. Betrachtet man nur den Ölgehalt, ohne Festigungsmittelintrag, nimmt die Druckfestigkeit durch

den Ölgehalt parallel zur Faser geringfügig ab, quer zur Faser dagegen leicht zu, was auf ein langsames Verdichten der Zellen hinweist.

Die künstliche Verölung stellt das Zusammenspiel von Ölextrakt und Festigungsmittel in einer Holzmatrix dar. Die tatsächliche Schädigung durch die jahrzehntelange Einwirkzeit des „Puckelins“ in Kunstobjekten und die damit verbundene Erweichung der Holzsubstanz konnte mit den vorhandenen Mitteln nicht dargestellt werden. Die Festigkeitswerte nach dem Einbringen von Festigungsmitteln geben dementsprechend keinen Einblick in die tatsächliche Festigkeit und Stabilität der betroffenen Objekte. Dennoch konnte ein Überblick über den Öleinfluss in den Festigungsprozessen gewonnen werden.

Die Untersuchungen ergaben, dass Degalan P28 als Konservierungsmittel für die Festigung verölter Kunstobjekte denkbar ist. Die Ergebnisse zeigen, dass das Acrylharz auch in Kombination mit einem Restölanteil erhöhte Festigungswerte aufweist. Dennoch sind die Werte durch das Vorhandensein des Öls stark herabgesetzt und es sollte Ziel nachfolgender Untersuchungen sein, die Entölungsverfahren weiter zu verbessern, um einen deutlich geringeren Restölgehalt in den Kunstobjekten zu erreichen.

Acrylharze weisen eine gute Alterungsbeständigkeit auf. Dennoch bleibt das Langzeitverhalten solcher Festigungsmittel im Zusammenspiel mit dem Öl fraglich und sollte vor Anwendungen an originalen Kunstobjekten aus Holz umfassend untersucht werden.

Die in den Versuchen verwendete Applikationsmethode der Vakuum-Druck-Tränkung ist aufgrund möglicher mechanische Beschädigungen der empfindlichen historischen Holzsubstanz nicht ohne weitere Untersuchungen und Parameteranpassungen für die Praxis geeignet. Sie diene ausschließlich einer modellhaften Darstellung, um eine Volltränkung zu simulieren und den Öleinfluss bewerten zu können.

Die Tränkergebnisse zeigen, dass bei Anwendung der Acrylharzfestigung in der Praxis zusätzlich begleitende Maßnahmen zur Nachbehandlung erforderlich sind. Die glänzende Oberfläche kann beispielsweise durch oberflächliche Behandlung mit Testbenzin erfolgen sofern keine empfindlichen Malschichten oder Fassungen beschädigt werden.

Der zeitliche Aufwand für Tränkung, Aushärtung und Nachbehandlung ist sehr groß. Aufgrund des Aufwandes und der Unsicherheiten, beispielsweise bezüglich des Langzeitverhaltens, erscheint es teilweise sinnvoll über eine Nachbildung ausgewählter Kunstwerke nachzudenken. Natürlich unter dem Aspekt der "Ultima Ratio". Dennoch hat der Erhalt originaler Kunst- und Kulturobjekte vorrangige Bedeutung und weitere Untersuchungen zur Eignung verschiedener Festigungsmittel sind erforderlich.

Die Thematik der Fassungen von Kunstobjekten wurde in den Untersuchungen nicht betrachtet. Sie bietet ein weiteres Forschungsfeld, da durch Fassungen sowohl die Entölung als auch die Festigungsmitteltränkungen erschwert werden. Es ist zu beachten, dass es durch die vorgeschlagene Behandlung mit Acrylharzen stets zu Beeinträchtigungen von Fassungen oder Bemalungen kommen kann, da es durch das Lösemittel zum Anquellen oder Auflösen der Malschichten kommen kann.

6. Ausblick

Ausgehend von dem DBU-Projekt Az 34509 „Zur Festigung entölter Holz- und Kunstobjekte und den daraus gewonnenen Erkenntnissen“ am Lehrstuhl für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik der TU Dresden ergeben sich neue Ansatzpunkte hinsichtlich der Verfahrensweise der Entölung. Folglich entstehen daraus auch neue Möglichkeiten der Holzfestigung als konservatorische, aber auch Holzmodifikations-Maßnahme.

Es ist aufgrund der Quellenlage davon auszugehen, dass mindestens 500 Kunstobjekte in Sachsen durch die um 1900 durchgeführte "konservatorische" Maßnahme der Öltränkung, zum Teil versetzt mit kanzerogenen Bioziden, betroffen sind. Hierbei sind Objekte aus ehemaligen deutschen Gebieten in Polen und Tschechien nicht einberechnet. Die daraus resultierenden Schäden durch entstehende Ölsäuren in den Objekten zeigen sich heute in unterschiedlichsten Formen und verstärken sich im Laufe der Zeit, auch durch Umwelteinflüsse bis hin zum Verlust einzelner Kunstobjekte. Zudem geben die betroffenen Holzobjekte mehr oder weniger giftige VOC's an ihre unmittelbare Umgebung ab und stellen eine Gesundheits- und Umweltgefährdung dar.

Die seit 2015 praktizierte Entölung von Kunstobjekten aus Holz (DBU-Projekt AZ 28606) durch den Restaurator Karsten Püschner zeigt den bisherigen Entwicklungsstand, welcher über Jahrzehnte durch Vorgängerprojekte erarbeitet wurde. Die bisherige Verfahrenstechnik führt zwar zu einer Entölung von Holzobjekten, wobei diese sehr langwierig ist und der erzielte Abreicherungsgrad maximal bei 50 % einzuordnen ist und somit eine nachhaltige Konservierung erschwert. Der Ölanteil in den Holzobjekten nach der bisherigen Entölung fungiert als Weichmacher gegenüber den üblichen aus Kunststoffen (aus fossilen Rohstoffen) bestehenden Festigungsmitteln. Eine Änderung bzw. Anpassung der Verfahrenstechnik hin zu einem Vakuum-Druck-Schaukelverfahren der Dampfphase im Autoklav könnte die Effizienz der Entölung hervorbringen. Durch den Einsatz umfangreicher und innovativer Sensorik wäre es möglich den Prozess der Entölung im Autoklav parametrisch so zu gestalten, dass eine schonende Dekontaminierung von Kunstobjekten erfolgt.

Das eingesetzte Lösungsmittel 1,3-Dioxolan weist während des Entölungsprozesses Eigenschaften auf, die nicht nur zum Abbau des Öls führen, sondern die stark geschwächte Holzmatrix durch das Herauslösen von Holzinhaltstoffen weiter schwächen und zerstören. Ein in Vorversuchen getestetes alternatives Lösemittel (MTBE) ist weniger toxisch, 1,3-Dioxolan steht auf der ständigen Liste der Stoffbewertung der EU, und löst aus dem Holz weniger Inhaltsstoffe bei besserer Abreicherung des eingebrachten Öles heraus. Das FT-IR Spektrum in Abbildung 134 wurde von Öl-Extrakten aus verölten Probekörpern des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom erstellt. Vergleichend sind Spektren von Öl-Extrakten mittels 1,3-Dioxolan und Methyl-*tert*-butylether (MTBE) entölter Lösemittel dargestellt. Die für Lignin typischen Phenol-Peaks bei 1084 und 1040 zeigen, dass 1,3-Dioxolan mehr Bestandteile des Lignins herauslöst als MTBE.

Weitere Versuche sollten die Vorteile von Methyl-*tert*-butylether (MTBE) unterlegen, wie z.B. das nicht Anlösen von ölgebundenen Fassungen sowie eine geringere Abreicherung von Holzinhaltstoffen, welche für den Zusammenhalt der noch vorhandenen Matrix verantwortlich sind. MTBE wird in großen Mengen Kraftstoffen zugesetzt und aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Ethyl-*tert*-butylether (ETBE) stellt das gleiche aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugte Lösemittel dar, welches ebenfalls in Vorversuchen zur Entölung herangezogen werden kann. ETBE wird hierbei aus Bioethanol und Isobuten generiert.

Einen wichtigen Faktor zur Einschätzung einer neuen Verfahrenstechnik der Entölung bzw. Festigung von Kunstobjekten stellt die Erfolgskontrolle dar. Dies könnte durch den Einsatz eines Versuchsautoklaven in Form einer Glasröhre im Gegensatz zu Edelstahl erfolgen, um durch bildgebende Verfahren, wie die Röntgen-CT, den Entölungsprozess zu begleiten. Der Autoklav kann somit während des Dekontaminierungs- bzw. Festigungsprozesses geröntgt werden.

Auch könnten gänzlich holzidentische oder -ähnliche Holzfestigungsmittel entwickelt werden, welche aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt werden können.

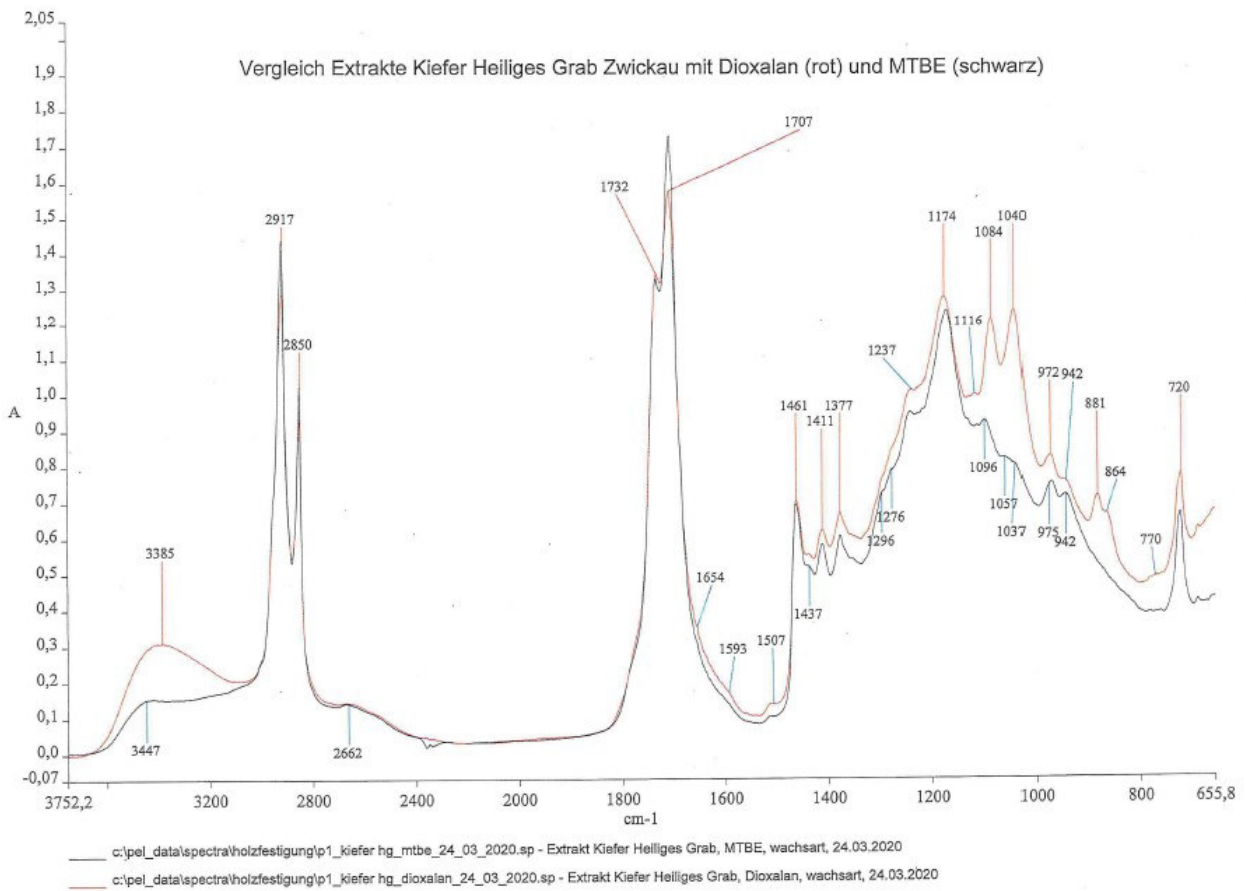


Abb. 134: FT-IR Spektrum von Öl-Extrakten mittels 1,3-Dioxolan und Methyl-*tert*-butylether (MTBE) (IHD)

7. Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Schematische Strukturformel eines getrockneten Ölfilms	10
Abb. 2: Hydrolyse eines Leinölmoleküls	11
Abb. 3: klebriger Film auf der Oberseite des Schleierbretts aus Ebersdorf (Quelle LfDS)	12
Abb. 4: Tropfenbildung an der Oberfläche durch austretende Öl-Harz-Lösung, Kruzifix Zwickau (Quelle LfDS)	12
Abb. 5: starke Verbräunung der Fassung der rechten Figur, HI. Katharina (restauriert) und HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)	13
Abb. 6: Abheben der Fassung durch Verölung, Engelsfigur Dreifaltigkeitskirche Görlitz (Quelle LfDS)	14
Abb. 7: vor der Entölung, HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)	16
Abb: 8: nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen (Quelle LfDS)	17
Abb. 9: Sockelbereich nach der Entölung	18
Abb. 10: Sockelbereich nach der Entölung	18
Abb. 11: Makroaufnahme (5fach) offener Holzsubstanz nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen	19
Abb. 12: Makroaufnahme (5fach) offener Holzsubstanz nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen	19
Abb. 13: Makroaufnahme (5fach) Zustand der Fassung nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen	20
Abb. 14: Makroaufnahme (5fach) Zustand der Fassung nach der Entölung, HI. Michael, Böhlen	20
Abb. 15: nach der Entölung, Johannes HI. Grab Dom Zwickau	21
Abb. 16: nach der Entölung mit Fehlstelle, defekte Holzstruktur unter der Oberfläche, Johannes HI. Grab Dom Zwickau	22
Abb. 17: Heiliges Grab, Dom Zwickau	25
Abb. 18: verölte (re.) und entölte (li.) Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom	25
Abb. 19: verölte Holzprobe, Faserlumen und teilweise Gefäße mit Öl gefüllt, Querschnitt, UV-Licht (200fach)	26
Abb. 20: entölte Holzprobe, nur noch vereinzelt Faserlumen mit Öl gefüllt, Querschnitt, UV-Licht (200fach)	26
Abb. 21: verölte Holzprobe, Fasern, Holzstrahlen und teilweise Gefäße mit Öleinlagerungen Tangentialschnitt, UV-Licht (200fach)	27
Abb. 22: entölte Holzprobe, vereinzelt in Fasern- und Längsparenchymzellen Ölbestandteile vorhanden, Tangentialschnitt, UV-Licht (200fach)	27
Abb. 23: Heiligenfiguren der Christophorus Kirche Böhlen	29
Abb. 24: HI. Valentin	30

Abb. 25: HI. Michael	30
Abb. 26: Fassungsoberfläche nach Entölung, Makroaufnahme, HI. Michael	31
Abb. 27: Ausbruchfläche nach der Entölung, Holzmehl eingelagert in Öresten, Makroaufnahme, HI. Michael	31
Abb. 28: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Valentin (VIS)	32
Abb. 29: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Valentin (UV)	32
Abb. 30: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Michael (VIS)	33
Abb. 31: Querschliff, Holzträger mit verölter Fassung nach der Entölung, HI. Michael (UV)	33
Abb. 32: nanotom 180NF	35
Abb. 33: nanotom 180NF, Probenraum	36
Abb. 34: verölte (re.) und entölte (li.) Lindenholzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom	36
Abb. 35: verölte Lindenholzprobe, Längsschnitt	37
Abb. 36: verölte Lindenholzprobe, Längsschnitt, Defektanalyse	37
Abb. 37: entölte Lindenholzprobe, Längsschnitt	38
Abb. 38: entölte Lindenholzprobe, Längsschnitt, Defektanalyse	38
Abb. 39: verölte Lindenholzprobe, Querschnitt, Defektanalyse	39
Abb. 40: entölte Lindenholzprobe, Querschnitt, Defektanalyse	39
Abb. 41: verölte (re.) und entölte (li.) Holzproben der Führungsbretter des Heiligen Grabes aus dem Zwickauer Dom	41
Abb. 42: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt	41
Abb. 43: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt	42
Abb. 44: verölte Linde, ölgefüllte Zellwände, Querschnitt	42
Abb. 45: verölte Linde, Fraßgang, in Öl gebundenes Fraßmehl	43
Abb. 46: verölte Linde, in Öl gebundenes Fraßmehl	43
Abb. 47: verölte Linde, in Öl gebundenes Fraßmehl	44
Abb. 48: entölte Erle, Querschnitt	44
Abb. 49: entölte Erle, Querschnitt	45
Abb. 50: entölte Erle, Querschnitt	45
Abb. 51: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt	46
Abb. 52: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt	46
Abb. 53: entölte Erle, Ölbläschen, Längsschnitt	47
Abb. 54: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Extrakt nach 0,5 Jahren (P8/1-4)	49
Abb. 55: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Bohrkernprobe	49
Abb. 56: HI. Johannes, Heiliges Grab, Dom Zwickau, Extrakt nach 0,5 Jahren (P8/3)	50

Abb. 57: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz (P1-P3)	50
Abb. 58: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)	51
Abb. 59: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)	51
Abb. 60: Engel, Dreifaltigkeitskirche, Görlitz, Bohrkernentnahme (P1-P3)	52
Abb. 61: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen (P4-P5)	52
Abb. 62: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen, Bohrkernentnahme (P5/1-2)	53
Abb. 63: HI. Valentin, Christophorus Kirche, Böhlen, Bohrkernprobe (P5/1-2)	53
Abb. 64: original Flasche Puckelin	61
Abb. 65: Großer Kessel, Entölungsaufklav, Restaurierungsatelier Püschner	62
Abb. 66: Großer Kessel, Entölungsaufklav, Restaurierungsatelier Püschner, Detail	62
Abb. 67: Öl-Extrakt	63
Abb. 68: durch Holzschädlinge degradierte Kiefernholzprüfkörper	64
Abb. 69: Bohrlehre	65
Abb. 70: Holzprüfkörper nativer und künstlich degradierter Linde	66
Abb. 71: Holzprüfkörper nativer und künstlich degradierter Linde	66
Abb. 72: Figur des HI. Johannes des Heiligen Grabes, Zwickauer Dom, vor der Entölung	68
Abb. 73: Figur des HI. Johannes des Heiligen Grabes, Zwickauer Dom, nach der Entölung	69
Abb. 74: durch Holzschädlinge degradierter Kiefernholzprüfkörper	70
Abb. 75: Makroaufnahme einer Bruchstellen der Figur des HI. Johannes	70
Abb. 76: Verdampfen des 1,3-Dioxolan (Siedepunkt: 75 °C) aus dem Öl-Extrakt bei 80 °C	72
Abb. 77: Tränkungsautoklav, Bestückung	72
Abb. 78: Tränkungsautoklav, Einbringen des Öl-Extrakts als Tränkungsmedium	73
Abb. 79: Getränkte Holzprüfkörper in der Tränkungswanne	74
Abb. 80: Holzprüfkörper im Wärmeschrank	75
Abb. 81: getränkte Holzprüfkörper, künstliche degradierte Linde mit 30 % Öl-Extrakt Anteil und natürlich degradierte Kiefer mit 30 % Öl-Extrakt Anteil	75
Abb. 82: System 1, Epoxidharz ipox, mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt	77
Abb. 83: System 2, Epoxidharz Araldite 2020, mit: ohne – Öl-Extrakt	78
Abb. 84: System 3, Epoxidharz Araldite 2020 Harz XW 396 mit Härter Jeffamine, mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt	78
Abb. 85: System 4, Epoxidharz HXTAL NYL-1, mit 30 % Öl-Extrakt	78
Abb. 86: System 5, Acrylharz Degalan, mit: ohne – 10 % - 30 % Öl-Extrakt	79
Abb. 87/ 88: Druckprüfung Festigungsmittel	80
Abb. 89: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan	80
Abb. 90: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan mit 10% Öl-Extrakt	80

Abb. 91: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Degalan mit 30% Öl-Extrakt	80
Abb. 92: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 mit Härter Jeffamine	81
Abb. 93: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 und Härter Jeffamine mit 10% Öl-Extrakt	81
Abb. 94: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von Araldite 2020 und Härter Jeffamine mit 30% Öl-Extrakt	81
Abb. 95: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von IpoX ER 1042/ EH 2064	81
Abb. 96: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von IpoX ER 1042/ EH 2064 mit 10% Öl-Extrakt	81
Abb. 97: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von IpoX ER 1042/ EH 2064 mit 30% Öl-Extrakt	82
Abb. 98: Spannungs/Dehnungs-Diagramm von HXTAL NYL-1 mit 30% Öl-Extrakt	82
Abb. 99: DSC 1 STAR System der Firma METTLER TOLEDO	83
Abb. 100: Thermogramm von Öl-Extrakt, -30-160 °C, 10 K/ min	83
Abb. 101: Thermogramm von Degalan (Feststoff), -30-160 °C, 10 K/ min	84
Abb. 102: Thermogramm von Degalan in Siedegrenzbenzin sowie mit 10 % und 30 % Öl-Extrakt, -30-160 °C, 10 K/ min	84
Abb. 103: Thermogramm von IpoX ER 1042/ EH 2064, -50-220 °C, 10 K/ min	84
Abb. 104: Thermogramm von IpoX ER 1042/ EH 2064 sowie mit 10 % und 30 % Öl-Extrakt, -50-220 °C, 10 K/ min	85
Abb. 105: Blasenbildung des Degalans P28 auf der Oberfläche	88
Abb. 106: Abdampfen des Lösemittels aus den Probekörpern nach der Tränkung im Abzug	88
Abb. 107: Einsaugen des eingefärbten Degalans P28 in den Laborautoklav	89
Abb. 108: Gefestigte Prüfkörper mit und ohne Farbstoff im Festigungsmittel (li. Linde, re. Kiefer)	91
Abb. 109: Gefestigte Prüfkörper ohne Öl, mit 10% Öl, mit 30% Öl	91
Abb. 110: Versuchsreihe aufgespaltener Probekörper: Unbehandelt, mit Degalan, mit Degalan und 10% Öl, mit Degalan und 30% Öl	92
Abb. 111: Degalan und 30% Öl in Linde und Kiefer	92
Abb. 112: Überschüssiges Festigungsmittel auf der Oberfläche eines Prüfkörpers	93
Abb. 113: Lichtmikroskopiebilder	94
Abb. 114: Universalprüfmaschine tira test 28100	95
Abb. 115: unbehandelte und mit Degalan konsolidierte Prüfgkörper	97
Abb. 116: 12 Varianten mit insgesamt 22 mittig quer aufgetrennten Prüfkörper	100
Abb. 117: Querschnitte P2 (10% Öl); M 7,5:1	102
Abb. 118: Querschnitte P3 (30% Öl); M 7,5:1	102
Abb. 119: Querschnitt P2 (10%) Öl in den Fasern erkennbar, nicht ausgetreten; M 90:1	102

Abb. 120: Querschnitt P3 (30%) Öl in den Fasern erkennbar, äußerst gering ausgetreten; M 100:1	102
Abb. 121: Querschnitt P5 Kiefer 10 % Öl + Degalanin den Fasern erkennbar, gering ausgetreten; M 100:1	103
Abb. 122: Querschnitt P6 Kiefer 30 % Öl + Degalan Öl in den Fasern erkennbar, mittelstark ausgetreten; M 100:1	103
Abb. 123: Querschnitt P10 Kiefer 10 % Öl, mit ELO getränkt, Öl stark ausgetreten; M 100:1	103
Abb. 124: Querschnitt P10 Kiefer 10 % Öl, Öl in den Zellen erkennbar, gering ausgetreten M 100:1	103
Abb.125: Holzfeuchte nach Klimalagerung	104
Abb. 126: Differentielle Quellung mit Degalan getränkter Prüfkörper	105
Abb. 127: Differentielle Quellung mit epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper	105
Abb. 128: Mittelwerte der Druckfestigkeiten parallel zur Faser	107
Abb. 129: Exemplarischer Vergleich dreier Kurven von degradierter Linde, parallel zur Faser	108
Abb. 130: Mittelwerte der Druckfestigkeiten quer zur Faser	109
Abb. 131: Exemplarischer Vergleich dreier Kurven von degradierter Kiefer, quer zur Faser	110
Abb. 132: Druckfestigkeiten parallel zur Faser Degalan und epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper	111
Abb. 133: Anteil organisch löslicher Verbindungen nach Acetonauszug im Normal- und Wechselklima	112
Abb. 134: FT-IR Spektrum von Öl-Extrakten mittels 1,3-Dioxolan und Methyl-tert-butylether (MTBE) (IHD)	115

7.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vermeintliche Konservierungsmaßnahmen an Holzobjekten in Sachsen nach Schönemann	7
Tab. 2: Analysen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung ölgetränkter Objekten	8
Tab. 3: Rohdichte	34
Tab. 4: Probenmaterial	48
Tab. 5: Gehalt an Fettsäuren im Probenmaterial	55
Tab. 6: Gehalt an gesättigten Fettsäuren im Probenmaterial	56
Tab. 7: Gehalt gesättigter Fettsäuren aus Extrakten der Entölung	56
Tab. 8: Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Probenmaterial	57
Tab. 9: Gehalt an ungesättigten Fettsäuren im Probenmaterial	57
Tab. 10: Gehalt ungesättigter Fettsäuren aus Extrakten der Entölung	58
Tab. 11: Zusammenfassung Fettsäuregehalte - nicht entölter Proben	58
Tab. 12: Zusammenfassung Fettsäuregehalte - entölter Proben	58
Tab. 13: Zusammenfassung Fettsäuregehalte – Extrakte	59
Tab. 14: Gegenüberstellung Restgehalte an Fettsäuren in entölten Proben und Gehalte im Extrakt	60
Tab. 15: Fettsäureanteile, Öl-Extrakte	61
Tab. 16: HI. Johannes, Zwickau	67
Tab. 17: E-Modul, maximale Kraft, Druckfestigkeit und Dehnungsgrenze ausgewählter Festigungsmittel	79
Tab. 18: Durchschnittliche Rohdichtewerte der Proben vor und nach der Festigung	90
Tab. 19: Untersuchungsmaterial; Prüfkörper (PK) und Varianten (V)	100
Tab. 20: Beladung und Rohdichte ölgetränkter Kiefer + Festigungsmittel Degalan	101
Tab. 21: Beladung und Rohdichte ölgetränkter Kiefer + Festigungsmittel epoxidiertes Leinöl (ELO)	102
Tabelle 22: Mittelwerte parallel zur Faser	107
Tabelle 23: Mittelwerte quer zur Faser (radial)	109
Tab. 24: Druckfestigkeiten mit Degalan getränkter Prüfkörper	110
Tab. 25: Druckfestigkeiten mit epoxidierten Leinöl getränkter Prüfkörper	111

7.3 Literaturverzeichnis

ABERLE, B.; KOLLER, M.: *Restauratorische Holzfestigung und die Infusionstränkung*. in: Holztechnologie und Holzkonservierung – Möbel und Ausstattungen. *Restauratorenblätter* Bd. 10. Wien, 1989

Altakten des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen

CLAUSNITZER, K. -D.: *Historischer Holzschutz. Zur Geschichte der Holzschutzmaßnahmen von der Steinzeit bis in das 20. Jahrhundert*. Freiburg 1990

CUANY, F.; SCHAIBLE, V.; SCHIEBL, U.: *Studien zur Festigung biologisch geschwächten Nadelholzes – Eindringvermögen, Stabilitätserhöhung, feuchtephysikalisches Verhalten*. in: ZKK Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Nr. 2, S. 249-292, 1989

BACHMANN, W.: *Das Imprägnieren wurmkrankter Hölzer*. in: Zeitschrift für Denkmalpflege I, Wien, Berlin 1926/27

BANIK, G; KRIST, G. (Hrsg.): *Lösungsmittel in der Restaurierung*. 3. Auflage, Wien 2003

BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T.; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. 30. Aufl., München 2007

BÖSENBERG, J.: *Die Konservierung der spätgotischen Holzfigur der Hl. Anna Selbdritt und die Konservierung und Restaurierung des linken Flügelschreins des Barbaraaltars von Peter Breuer aus der Friedhofskapelle zu Lichtentanne*. Diplomarbeit HfBK Dresden, 1986

DBU-Projekt Az 08001: *Einsatz von Metalloxid-Solen in der Holz- und Werkstoff-Industrie*, Feinchemie GmbH Sebnitz, 1997

DBU-Projekt Az 08118: *Dekontaminierung ölicher, chlorkohlenwasserstoffhaltiger Holzschutz- und Holzfestigungsmittel aus musealen und denkmalgeschützten Objekten*, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2000

DBU-Projekt Az 08001/02: *Einsatz von modifizierten Siliciumdioxid-Nanosolen in der Holz- und Holzwerkstoffindustrie*, Feinchemie GmbH Sebnitz, 2001

DBU-Projekt Az 17314: *Detoxifizierung Holzschutzmittel belasteter national wertvoller Kunstobjekte mit Farbfassungen und Oberflächenveredelungsschichten am Beispiel des Epitaphs von Döben und des Heiligen Grabes des Stiftes Neuzelle*, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2003

DBU-Projekt AZ 28606-45: *Entwicklung und modellhafte Erprobung einer Technologie zur zerstörungsfreien Extraktion und Restaurierung von biozid und umweltgeschädigten Holzobjekten*, Dipl.-Rest. Karsten Püschner, 2015

DBU-Projekt Az 30165: *Analyse historischer Carbolineumimprägnierungen als Grundlage konservatorischer Dekontaminierung und modellhafte Erprobung neuer Sanierungstechnologien*, Rathgen-Forschungslabors, Staatliche Museen zu Berlin, Stiftung Preußischer Kulturbesitz, 2015

DIN EN 131 83-1 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz. 2002

DIN 50014 Normalklimate für Vorbehandlung und/oder Prüfung—Festlegungen. 2018

DIN 51005 Thermische Analyse (TA) - Begriffe. 2018

DIN 51007 Thermische Analyse (TA) – Differenz-Thermoanalyse (DTA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) – Allgemeine Grundlagen. 2019

DIN 52 180-1 Prüfung von Holz – Probenahme – Grundlagen. 1977

DIN 52 182 Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte. 1976

DIN 52 184 Prüfung von Holz Bestimmung der Quellung und Schwindung. 1979

DIN 52 185 Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. 1976

DIN 52 192 Prüfung von Holz - Druckversuch quer zur Faserrichtung. 1979

DIN 68364 Kennwerte von Holzarten Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. 2003

DIN EN 350-2 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. 1994

DIN EN ISO 11357-1 Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. 2017

EICHNER, U.; ALIMORADIAN, S.; OTTO, K.: *Holz*. in: *Die Kunst zu bewahren*. Leipzig 2006

EISBEIN, M.: *Dekontaminierung und Dekonsolidierung von schädlichen Holzkonservierungsmitteln an Kunst- und Kulturgut*. in: Denkmalpflege in Sachsen, Jahrbuch 2010, Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege, S. 85-91, 2010

EISBEIN, M.: *Möglichkeiten der Holzfestigung in der Holzrestauration*. in: Holztechnologie 57, S.37–46, 2016

EMMERLING, E.: *Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung*. in: Beiträge einer Fortbildungsveranstaltung der Restaurierungswerkstätten des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege am 4. Mai 1992 in München. München 1995

FRICK, A.; STERN, C.: *DSC-Prüfung in der Anwendung*. 2. Aufl., München, 2013

FUHRMANN, A.; HIETSCHOLD, V.; EISBEIN, M.; PÜSCHNER, K.; WEIß, B.: *Extraktion ölgetränkter Holzobjekte. Prozesskontrolle an einem Beispiel*, in: VDR Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, Heft 1, S. 73-83, 2019

GENSTER, J.: *Vergleich marktüblicher Holzkkonservierungsmittel mit polymeren Tränkmitteln auf Basis nachwachsender Rohstoffe für die Holzkonservierung*, Diplomarbeit; Technische Universität Dresden, Institut für Holz und Papiertechnik, Lehrstuhl Holz- und Faserwerkstofftechnik, 2006

GIORGI, R.; CHELAZZI, D.; BAGLIONI, P.: *Nanoparticles of Calcium Hydroxide for Wood Conservation. The Deacidification of the Vasa Warship*, Department of Chemistry an CSGI, University of Florence. in: Langmuir, Vol. 21, No. 23, S. 10743-10748, 2005

HEFTER, G.: *Technologie der Fette und Öle*, 3. Band, Heidelberg, 1921

HILDEBRAND, W. T. W.: *Die Erneuerung der Wohlgenutschen Altargemälde in der Hauptkirche St. Mariae zu Zwickau*. in: Archiv merkwürdiger Urkunden und Nachrichten aus alter und neuer Zeit, Bd. 1, Heft 1, Leipzig 1833

JANTSCH, C.: *Behandlung alter wurmzerstörter Holzschnitzereien und Malereien auf Holz*. in: Deutsche Kunst und Denkmalpflege 9, Berlin, Wien 1934

JANTSCH, C.: *Versuch in der Behandlung alter Holzschnitzereien und Malereien auf Holz*. in: Der Kunstmarkt, Beilage zur Kunstchronik. Heft 7, Leipzig 1912/13

JANTSCH, C.: *Versuch in der Behandlung alter Holzschnitzereien und Malereien auf Holz*. in: Der Kunstmarkt, Beilage zur Kunstchronik. Heft 8, Leipzig 1912/13

Kirchaktenarchiv, Marienkirche Zwickau, Akten des Bauausschusses der Marienkirche Zwickau, 1907

KÜHN, H.: *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken*. in: Material und Technik, Konservierung und Restaurierung, 3. Aufl., München 2001

KÜHNER, H.: *Epoxidharze für die Holzrestaurierung - Materialien für die Festigung stark geschädigter, tragender oder mechanisch beanspruchter Holzsubstanz*. in: Holz - Ergänzung, Festigung, Kittung, S.12–99, München 2008

MAGIRIUS, H.: *Geschichte der Denkmalpflege in Sachsen bis 1945*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1987

MARTIN, D. & KRAUTZBERGER, M. (2004): *Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege, einschliesslich Archäologie: Recht - fachliche Grundsätze - Verfahren – Finanzierung*. München 2004

MARUTZKY, R.: *Holzschutz: Praxiskommentar zu DIN 68800 Teile 1 bis 4*. 2. Aufl., Berlin, Wien, Zürich 2013

MATTEINI, M.; MOLES, A.; BURMESTER, A.: *Naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden in der Restaurierung*. München 1990

NICKEL, E.: *SiO₂-Nanosole für die Holzkonservierung*. Facharbeit der Fachhochschule Köln im Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaften, 2004

NUSSER, A.; OSTERLOH, K.; FREITAG, M.; SIMON, S.: *Analyse von mit Carbolineum belastetem Kulturgut und modellhafte Erprobung konservatorischer Dekontaminierung*. in: Berliner Beiträge zur Archäometrie, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft, Bd. 22, 2014

OSTERLOH, K.; BELLON, C.; HOHENDORF, S.; KOLKOORI, S.; WROBEL, N.; NUSSER, A.; FREITAG, M.; BÜCHERL, T.; BAR, D.; MOR, I.; TAMIN, N.; WEISS-BABAI, R.; BROMBERGER, B.; DANGENDORF, V.; TITTELMEIER, K.: *Computed Tomography with X-rays and Fast Neutrons for Restoration of Wooden Artwork*. in: Proceedings of the 10th World Conference on Neutron Radiography (WCNR-10) Grindelwald, Switzerland October 5–10, 2014 Physics Procedia, Vol.69, 2015

Parthey, A.: *Historische Holzfestigungsmittel auf Leinölbasis – Versuche zur Härtung von Leinöl mittels ionisierender Strahlung*, Diplomarbeit, Fachhochschule Potsdam, Studiengang Restaurierung, 2011

PFAU, C.: *Die Rochlitzer Kunigundenkirche*. Rochlitz 1929

Püschner, K.: *Verfahren und Vorrichtung zur Extraktion von ölhaltigen Festigungsmitteln aus Holzobjekten*. 102009046296 (A1), Europäisches Patentamt 2011

RIJSDIJK, J. F.; LAMING, P. B.: *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Dordrecht, Boston, London, 1994

RINGGAARD, M.: *Meadelelser om Konservierung 3*, 1989

RÖLLIG, S.: *Eignung von Calciumhydroxid-Nanosol zur Konservierung ölgetränkter Hölzer*, Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, Fachklasse für Konservierung und Restaurierung von Bildwerken und Raumausstattung, 2013

RÖMPP LEXIKON CHEMIE – Version 1.3, Stuttgart/New York 1997

SANDNER, I.: *Konservierung von Gemälden und Holzskulpturen*. Berlin 1990

SCHEIDING, W.; GRABES, P.; HAUSTEIN, T.; HAUSTEIN, V. H.; NIEKE, N.; URBAN, H.; WEIB, B.: *Holzschutz: Holzkunde - Pilze und Insekten – Konstruktive und chemische Maßnahmen - Technische Regeln – Praxiswissen*. 2. Auflage, München, Leipzig 2016

SCHIESEL, U.: *Historischer Überblick über die Werkstoffe der schädlingsbekämpfenden und festigkeitserhöhenden Holzkonservierung*. in: Maltechnik-Restauro 90. Jahrgang, 04/ 1984

SCHIEBEL, U.: *Probleme der Konservierungsstoffe zur Festigkeitserhöhung von degradiertem Holz*. in: Bilfinger, M.; Meili, D. (Hrsg.): *Konservierung von Holzbauten*. Bern, Stuttgart 1989

- SCHIEBEL, U.: *Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz*. in: Petzet, Michael (Hrsg.): Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Bd. 73. München 1993
- SCHIEBL, U.: *Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz. Holzschutz. Holzfestigung. Holzergänzung*. in: Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, S. 15–27, München 1995
- SCHÖNEMANN, A.; FRENZEL, W.; UNGER, A.; KENNDLER, E.: *An Investigation of the Fatty Acid Composition of New and Aged Tung Oil*, Studies in Conservation 51, 2006
- SCHÖNEMANN, A.; EISBEIN, M.; UNGER, A.; DELL'MOUR, M.; FRENZEL, W.; KENNEDELER, E.: *Historic Consolidants for Wooden Works of Art in Saxony*. in: STUDIES IN CONSERVATIONS 53, 2008
- SCHWABE, A.: *Zur Volltränkung von Holz mit Methylmethacrylat*, Diplomarbeit, Technische Universität München, Studiengang Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft, 2006
- SCHWEINGRUBER, F.H.: *Mikroskopische Holz Anatomie*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 3. Aufl., Birmensdorf, 1990
- SUTTER, H.-P.: *Holzschädlingen an Kulturgütern erkennen und bekämpfen: Handbuch für Denkmalpfleger, Restauratoren, Konservatoren, Architekten und Holzfachleute*. Bern 1997
- UNGER, A.; SCHNIEWIND, A. P.; UNGER, W.: *Conservation of Wood Artefacts*, Berlin, Heidelberg, New York 2001
- UNGER, A.: *Umweltschädliche Holzschutzmittel*, in: Restauo 3, 1998
- WAGENFÜHR, A.; SCHOLZ, F.: *Taschenbuch der Holztechnik*. 2. Aufl, München, Leipzig 2012
- WAGENFÜHR, R.: *Holz atlas*. 6. Aufl., Leipzig, 2007
- WAGENFÜHR, R.: *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik, Identifizierung, Nomenklatur, Mikrotechnologie*. 5. Aufl., Leinfelden-Echterdingen 1999
- WAENTIG, F.: *Kunststoffe in der Kunst*. Petersberg 2004
- WEIDNER, T.; EICHNER, U.; HECK, G.; UNGER, A.: *Die Harzlösung Sommerfeld. Ein Berliner Holzfestigungsmittel der dreißiger Jahre*, in: Restauo 6, 1999
- WUNDERLICH, C.-H.; HILFRICH, U.; WESER, U.: *Schonende Abnahme von gealterten Leinölfirnissen, Ein neues Konzept mit Alkali-PEG-Lösung*. in: Restauo, Heft 1, S. 46-54, 2003