

Hygrothermische Farbmodifikation von Laub-Massivholz

Brücke zwischen Rohstoff über Weiterverarbeitung

bis zum Kunden

R. Putz

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

6/2007

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Hygrothermische Farbmodifikation von Laub-Massivholz

Brücke zwischen Rohstoff über Weiterverarbeitung
bis zum Kunden

Robert Putz, Michael Grabner, Johannes Pöckl
Kompetenzzentrum Holz GmbH

Hermann Pretzl, Jürgen Pimmingstorfer, Georg Strobl,
Monika Größwang
Alfa Massivholzplatten GmbH

Günther Gruber
Mühlböck Holz Trocknungsanlagen GmbH

Manfred Reinkemeier
Abalon Hardwood GmbH

Herbert Wimmer
Rupert Wimmer & Co

Wels, März 2007

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Kurzfassung

Die Qualität der erzeugten Holzprodukte und der effiziente Einsatz des Rohstoffes Holz, sowie kontrolliert steuerbare Produktionsprozesse bestimmen maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg eines holzverarbeitenden Unternehmens. Mangelnde Kenntnis über ungewollte Verfärbungsvorgänge im Laubholz während der Lagerung bzw. der Trocknung und Dämpfung führen beim Durchlaufen der Prozess- und Produktionskette zu erheblichen Qualitätsverlusten und einer damit verbundenen Wertminderung.

Aufgrund neuer Technologien bieten sich für den Prozess des Trocknens und Dämpfens neue Möglichkeiten der Holzbehandlung an. Erarbeitetes Wissen aus der Praxis muss kritisch durchleuchtet und mit fundierten, grundlegenden Analysen und Untersuchungen überprüft werden, um zukünftig auf strukturierte Erkenntnisse und Ergebnisse zurückgreifen zu können.

Ziel dieses Projekts war es eine wissenschaftliche Grundlage für die gezielte hygrothermische Behandlung mittels Dämpfung- und Trocknung von Buchen-, Eichen- und Erlenschnittholz zu schaffen. Einsatzmöglichkeiten spektralanalytischer Messmethoden zur Bestimmung und Überwachung des Farbänderungsprozesses während der Holz Trocknung wurden untersucht. Zusätzlich sollten neue Erkenntnisse über die Einflüsse auf die Farbgestaltung aus der „Vorgeschichte“ des Holzes gewonnen werden.

Es stand Probenmaterial der drei oben genannten Holzarten aus Europa zur Verfügung. Als Kontrollwerte für die Endfarben der Frischluft-/Ablufttrocknungen dienten anfänglich, aus Mustern der Praxis, erstellte Farbkarteien. Es wurden sowohl Dämpfversuche als auch Konvektionstrocknungen in der Industrie und im Labor durchgeführt. Für die objektive Bestimmung der Farbe wurden die Farbwerte nach dem CIE-L*a*b* Farbsystem mit einem Farbmessgerät aufgenommen.

In Abhängigkeit von der Holzanfangsfeuchte, der Temperatur und der Einwirkzeit besteht die Möglichkeit die Holzfarbe signifikant zu beeinflussen. Ungleichmäßige Verfärbungen haben ihre Ursache im Vorhandensein von Pilzen, einer ungleichmäßigen Extraktstoffverteilung im Brett sowie dem lokalen Wirken von Enzymen. Durch eine zielgerichtete Wärmebehandlung kann die Aktivität der Enzyme für den Verfärbungsmechanismus genutzt oder auch unterbunden werden.

Streifige Verfärbungen bei anfangs gefrorenem Holz können durch eine zu Beginn niedrig gewählte Auftautemperatur für das Durchwärmen des Holzes vermieden werden. Gleichmäßige helle Farbtöne über den gesamten Brettquerschnitt sind somit auch in den Wintermonaten erreichbar.

Eichenholz kann nach einer vorzeitigen Hitzebehandlung auch im frischen Zustand bereits bei höheren Temperaturen getrocknet werden ohne dabei zu Fleckenbildung zu neigen.

Summary

The quality of wooden products and the efficient application of the raw material (wood), as well as monitored processes in the production decisively determine the economic success of a wood-processing enterprise. Lack of knowledge about discoloration processes during storage, drying and steaming of hardwood leads to considerable high economic losses and a depreciation of the material.

On account of new technologies new possibilities are given for the treatment of wood by drying or steaming. Compiled knowledge from practise must be analysed critically and be checked by basic research and investigations to ensure stable hygrothermal processes in the future.

The purpose of this project was to create a scientific basis for the specific hygrothermal treatment by means of steaming and drying of beech, oak and Common alder timber. The possible application of spectral-analytical measuring methods for controlling and supervising the change of colour during the wood drying process were examined. In addition, new knowledge about the influence of the history of the logs and the timber on the colouration should be developed.

Sample material was available of the three abovementioned species of wood from Europe. At the beginning, the colour of industrial used samples, sorted by colour were defined as controlling values for the colour results of the fresh air and exhaust air drying experiments. Steaming and convectional drying experiments were carried out in the industry as well as in the lab. For an objective comparison of the samples the colour values were taken using the CIE-L*a*b* colour system with a colour measuring instrument.

Depending on the initial moisture content, the temperature and the duration it is possible to influence the change of the colour significantly. Irregular discolorations have their cause in the presence of fungi, an irregular distribution of extractives in the board as well as a locally concentrated activity of enzymes. Depending on the temperature level of the heat treatment the activity of the enzymes can be used for the discoloration mechanism or also be prevented.

Streaky discolorations occurring after the drying process on wood which was frozen at the beginning of the thermal treatment can be avoided by a low temperature level in the early stage of defrosting the timber. Steady bright tones across the whole board cross section are also possible during the winter months.

After a thermal pre-treatment, oak with an initial moisture content above 30 % can also be dried at higher temperature levels without inclining to spotted brown discoloration.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	BUCHE (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	9
2.1	Zielsetzung.....	10
2.2	Material und Methode.....	11
2.2.1	Versuchsablauf „Buchenschnittholzdämpfung“	11
2.2.2	Versuchsablauf „Auftauen von Buchenschnittholz“	13
2.3	Ergebnisse.....	15
2.3.1	Buchenschnittholzdämpfung	15
2.3.2	Auftauen von Buchenschnittholz	22
3	ERLE (<i>Alnus glutinosa</i> Gaertn.)	24
3.1	Zielsetzung.....	25
3.2	Material und Methode.....	26
3.2.1	Versuchsablauf „Erlenversuchstrocknung“	26
3.3	Ergebnisse.....	29
3.3.1	Vergleich Industrie- mit Labortrockner.....	29
3.3.2	Onlinefarbmesssystem.....	31
3.3.3	Trocknungsversuche.....	32
3.3.4	UV-Stabilität.....	36
3.3.5	Shigometrische Untersuchungen	37
4	Färbung von Erlen- und Buchenklötzchen mit Laccase.....	42
4.1	Imprägnierung.....	42
4.2	Einfluss der Laccasekonzentration und der Einwirkdauer auf die Holzfärbung	42
5	Holzextraktstoffbestimmungen	46
5.1	Material und Methoden.....	46

5.2	Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen	46
6	Eiche (<i>Quercus</i> sp.)	49
6.1	Material und Methoden.....	49
6.2	Ergebnisse.....	52
6.3	Eichenverfärbung durch Pilze.....	54
7	Kostenabschätzung	56
8	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	57
9	Schlussfolgerungen	59
9.1	Workshops und Präsentationen.....	60
9.2	Realisierung der Leitprinzipien	60
10	Ausblick.....	62
10.1	Industrielle Umsetzung.....	62
10.2	Weiterführende Untersuchungen zur hygrothermischen Holzmodifikation.....	62
	Literaturverzeichnis.....	63
	Abbildungsverzeichnis	63
	Tabellenverzeichnis.....	65

1 Einleitung

Die Qualität der erzeugten Holzprodukte und der effiziente Einsatz des Rohstoffes Holz, sowie kontrolliert steuerbare Produktionsprozesse bestimmen maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg eines holzverarbeitenden Unternehmens. Mangelnde Kenntnis über ungewollte Verfärbungsvorgänge im Laubholz während der Lagerung bzw. der Trocknung und Dämpfung führen beim Durchlaufen der Prozess- und Produktionskette zu erheblichen Qualitätsverlusten und einer damit verbundenen Wertminderung.

Mit dem gegenwärtigen Stand des Wissens ist es nur sehr schwer möglich, eine definierte und gleichmäßige Farbe, sowohl auf der Oberfläche, als auch über den gesamten Holzquerschnitt durch entsprechende Prozessparameter einzustellen und zu reproduzieren.

Aufgrund neuer Technologiemöglichkeiten muss man den Prozess des Trocknens und Dämpfens neu betrachten und modellieren, um den geforderten effizienteren Ressourceneinsatz und eine einhergehende Kostenersparnis herbeizuführen. Die oft nur auf Erfahrungswerten begründeten Trocknungs- und Dämpfprogramme müssen kritisch durchleuchtet und die Vorgänge bei der Holzverfärbung in ihren grundlegenden Reaktionen analysiert werden.

Durch die Temperatureinwirkung bei hoher Holzfeuchtigkeit ohne Trocknung soll bewirkt werden, dass einerseits die Farbe des Holzes homogenisiert und der Farbton verändert wird.

Verzug- und rissfreie technische Trocknung von Schnittholz stand bereits im 19. Jahrhundert im Mittelpunkt des Interesses der Holzforschung. Zum Thema Verfärbungen von Vollholz bei der künstlichen Holz Trocknung gab es erst wesentlich später erste Ansätze und Überlegungen für die Ursachen und Zusammenhänge. In einer ausführlichen Zusammenfassung halten KOLLMANN, KEYLWERTH und KÜBLER (1951) die auf diesem Gebiet bis zum Jahre 1951 vorliegenden Arbeiten fest und erweitern das Wissen durch eigene Versuchsreihen. Forschungsarbeiten zur gezielten und kontrollierten Farbveränderung von Holz durch Temperatur- und Feuchtebehandlung bauen im Wesentlichen auf den damaligen Erkenntnissen auf. Eine umfassende Literatur- und Datenbankrecherche (HERBERS und WIMMER 2004) sowie Untersuchungen, welche im Rahmen diverser Projekte zum Thema Holz Trocknung und Holzverfärbung an der Universität für Bodenkultur Wien (HERBERS und STINGL 2003) und durchgeführt wurden, dienen als Grundlage für die zu erstellenden systematischen Versuchspläne und Versuchsreihen.

Arbeitsplan:

Der experimentelle Teil gliedert sich in mehrere Gebiete auf (Tabelle 1). Wobei die einzelnen Untersuchungen aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen nicht bei jeder der drei Hauptholzarten Anwendung fanden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden sie aber allgemein beschrieben und ergänzend die jeweiligen Besonderheiten für die einzelnen Holzarten erläutert.

Tabelle 1: Zuordnungsmatrix für die durchgeführten Untersuchungen

		Buche	Eiche	Erle
Trocknungs- versuche	Auswirkungen des Auftauens	x		
	Frischluft/Abluft-Trocknung		x	x
	Kombiprozesstrocknung		x	x
Dämpfung	Indirektes Verfahren	x		
biochemische Untersuchungen	Extraktstoffgehalt	x	x	x
	Shigometrie			x
	Enzymeinfluss	x		x

2 BUCHE (*Fagus sylvatica* L.)

Das Dämpfen von Buchenschnittholz ist ein seit langer Zeit bekanntes und in beträchtlichem Umfang durchgeführtes Verfahren in der Sägeindustrie. Hierbei wird traditionellerweise frisch eingeschnittenes Holz in Dämpfkammern einer Satttdampfatmosfera bei Temperaturen zwischen 80°C und 100°C ausgesetzt. Durch die Dampfbehandlung des Schnittholzes mit einem Holzfeuchtegehalt über dem Fasersättigungsbereich soll erreicht werden, dass:

- 1) eine Vergleichmäßigung der Holzfarbe erreicht wird, wobei gleichzeitig
- 2) der Farbton des Holzes zu einem etwas dunkleren verändert wird (meist rötlich-braun),
- 3) die Holzfeuchteverteilung für die anschließende Trocknung gleichmäßig wird,
- 4) Spannungen abgebaut werden und
- 5) eine geringfügige Quellungsvergütung erzielt wird.

Die Trocknung des gedämpften Schnittholzes erfolgt im Anschluss an den Dämpfprozess. Häufig erfolgt diese in zwei Schritten. Eine Freilufttrocknung bis ca. 30 % Holzfeuchte und nachfolgend eine technische Trocknung auf die gewünschte Endfeuchte (8-10 %) für die Weiterverarbeitung.

Farbveränderung und Quellungsvergütung werden bei Schnittholz in der Regel durch Behandlungstemperaturen deutlich über 100 °C erreicht. Für eine Verringerung der Quellungseigenschaften von Holz mittels klassischer Dämpfprozesse, welche eine Temperaturbegrenzung bei knapp 100 °C haben, ist der Zeitaufwand relativ hoch. Um Zeit und Energie bei der Dämpfung und Trocknung zu sparen kommen seit der jüngsten Vergangenheit zusehends auch kombinierte Dämpftrockenkammern zum Einsatz. Die Dämpfung des Schnittholzes auf Latten und nicht mehr im Block bietet die Möglichkeit der schnelleren Holzdurchwärmung. Damit einhergehend genügen kürzere Dämpfzeiten um über den Brettquerschnitt eine einheitliche Farbgebung zu erzielen. Dies kann besonders für das Einstellen heller Farbtöne bei der Buchenschnittholzdämpfung genutzt werden.

Eine anschließende technische Trocknung erfolgt ohne Unterbrechung in der Dämpf-Trockenkammer. Schnittholzmanipulation und die Freiluftlagerung entfallen somit gänzlich.

Als Alternative bietet sich für eine Wärmebehandlung mit Temperaturen oberhalb 100°C eine Dämpfung unter Überdruck an. Mit einem Überdruckkessel könnten Konditionierung und Farbveränderung in einem Verfahrensschritt durchgeführt werden.

2.1 Zielsetzung

Im Rahmen des Projekts soll das Verfärbungsverhalten von Buchenschnittholz bei der Dämpfung mit und ohne Stapellatten untersucht werden. Hauptaugenmerk wurde hierbei auf die Farbgebung durch den Dämpfprozess gelegt. Zusätzlich wurden Untersuchungen bezüglich einer möglichen Beeinflussung der Holzeigenschaften durch das Dämpfen in Hinblick auf das Quellungsverhalten durchgeführt.

Mit den gewonnenen Proben soll zusätzlich eine Farbkartei für gedämpftes Buchenholz erstellt. Anhand dieser unter unterschiedlichen Bedingungen gedämpften Proben wurde zusätzlich die höhere UV-Stabilität der Farbe von gedämpften Buchenbrettern mittels künstlicher UV-Bestrahlung aufgezeigt.

Die modernen Produktionsmethoden und der immer größer werdende Bedarf an Buchenschnittholz für die weiterverarbeitende Industrie führten zu einem Umdenken in der Einschnitthaltung der Sägewerke. Wurde Laubholz vorwiegend in den Wintermonaten eingeschnitten, erfolgt dies heutzutage in immer größerem Maße ganzjährig. Unterschiedliches Ausgangsmaterial für die Dämpfbehandlung und technische Trocknung erfordern zusätzliche Untersuchungen zu den ‚neuen‘ Rahmenbedingungen der Schnittholztrocknungen.

Somit sollte in einem zweiten Arbeitspunkt der Einfluss der Auftautemperatur bei der technischen Trocknung von Buchenschnittholz, welches in gefrorenem Zustand in die Trockenkammern kommt, genauer analysiert werden. Das Aufzeigen von Farbveränderungen durch den Einsatz unterschiedlicher Auftautemperaturen und damit einhergehend unterschiedlicher Auftauzeiten war hier Gegenstand der Untersuchungen.

2.2 Material und Methode

Für die Versuchsreihen mit Buche musste aufgrund der zeitlichen Rahmenbedingungen für das Projekt Buchenschnittholz, welches während der Sommermonate wassergelagert wurde, genommen und in einem Tiefkühlraum bei -10 °C gelagert werden. Das Buchenrundholz stammt aus deutschen Forstbetrieben und wurde von einem Salzburger Sägewerk im Juli 2005 eingeschnitten. Die unmittelbar nach dem Einschnitt entnommenen unbesäumten Bretter wiesen eine Stärke von 32 mm (Dämpfversuche) bzw. 40 mm (Auftauversuche) auf und wurden für die Versuche auf 20 cm Breite besäumt und 50 cm abgelängt. Durch das Einfrieren des Probenmaterials wurde sichergestellt, dass während der Lagerung keine Verfärbungen auftreten können und somit weitestgehend konstante Ausgangsbedingungen für die Dämpf- und Auftauversuche zur Verfügung standen.

2.2.1 Versuchsablauf „Buchenschnittholzdämpfung“

Für die Dämpfversuche der Buchenproben wurden die tiefgefrorenen Bretter zunächst für 5 Stunden bei Raumtemperatur (22 °C) aufgetaut. Somit wiesen die Proben zu Beginn der anschließenden Dämpfung im Mittel eine Holzkerntemperatur von 5 °C auf. Um ein oberflächliches Abtrocknen der Proben während des Auftauschrittes zu vermeiden, erfolgte eine Lagerung während der 5 Stunden in luftdichten Kunststoffbeuteln.

Im Anschluss an das Auftauen wurden von den Brettern Proben für die Bestimmung des Feuchteprofils vor dem Dämpfen herausgeschnitten. Für das Holzfeuchteprofil über die Brettbreite werden jeweils Proben von den Rändern und der Mitte entnommen (Abbildung 1). Derartige Schichtproben für die Feuchtebestimmung wurden auch nach dem Dämpfvorgang entnommen. Die einzelnen Schichtproben wurden bei 103 °C 48 Stunden im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz gedarrt. Nach der Entnahme der Schichtproben für die Holzfeuchtebestimmung wurden die Enden der Bretter mit wasserfestem Allzweckkleber und Alufolie versiegelt, um annähernd die Bedingungen in der Mitte eines langen Brettes zu simulieren. Es sollte dadurch der Einfluss von Vorgängen an der Brettstirnseite (rascheres Abtrocknen, schnelleres Eindringen von Dampf) unterbunden werden.

Das Einführen eines PT100 Thermoelementes für die laufende Bestimmung der Holzkerntemperatur geschah über ein 8 cm tiefes Bohrloch an der Brettseite. Das Aufzeichnungsintervall war eingestellt auf eine Temperaturprotokollierung alle 2 min.

Des Weiteren konnten aus den behandelten Versuchs Brettern für die Ermittlung des tangentialen und radialen Quell- und Schwindmaßes Probenkörper mit $25 \times 25 \times 35\text{ mm}$ (rad/long/tang) herausgeschnitten werden. Die Bestimmung der „Quellung und Schwindung“ wurde nach der gleichlautenden DIN 52184 durchgeführt. Lediglich auf die Ermittlung der Quell- und Schwindmaße für gedämpftes Holz in longitudinaler Richtung wurde verzichtet.

Die Farbmessungen wurden nach dem L*a*b* Farbsystem durchgeführt. Die einzelnen Farb- und Helligkeitswerte werden in ihre Bestandteile zerlegt und zahlenmäßig dargestellt. Die Koordinate L* bezeichnet dabei die Helligkeit der zu messenden Oberfläche. Mit a* wird der rot/grün Anteil beschrieben und b* gibt den blau/gelb Anteil der Farbe an. Subjektives Empfinden eines Beobachters sowie verschiedenartige Betrachtungsweisen der Prüfkörper sollten mit einem objektiven Messsystem ausgeschlossen werden. Aufgrund der inhomogenen strukturierten Oberfläche von Holz wurden die Farbmessungen mit einem Gerät der Fa. Minolta („Chroma-Meter CR 410“) durchgeführt. Verwendet wurde ein 2°-Normbeobachter bei einer D65 Beleuchtung der Probenoberfläche. Die Messfläche ist dabei gegen fremdes Licht aus der Umgebung abgeschirmt und hat einen Durchmesser von 50 mm. Der große Messfleck bewirkt, dass strukturbedingte Farbunterschiede an der Holzoberfläche in die Mittelwertbildung mit einbezogen werden. Zur objektiven Bestimmung der Holzfarbe wurden die Proben beidseitig an der Oberfläche gehobelt und die Farbe an 6 Punkten gemessen. Die Charakterisierung der bei den einzelnen Dämpfbedingungen erzielten Farbtöne erfolgte mittels der ermittelten Farbwerte.

Als Referenzwert für die unterschiedlich gedämpften Buchenproben dienten immer unbehandelte, bei Normklima (20 °C/65 % rel. Luftfeuchte) gelagerte Prüfkörper, die in der gleichen Art und Weise aufgeschnitten wurden.

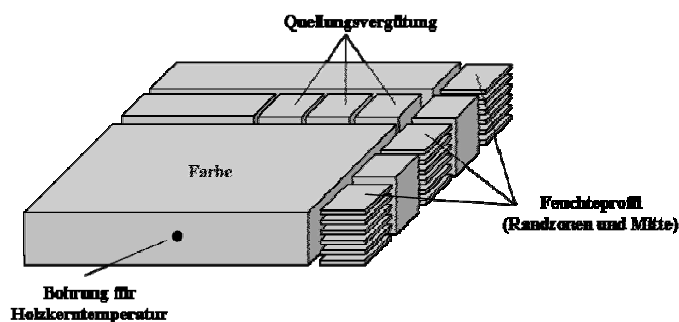


Abbildung 1: Schnittmuster für die Probenuntersuchungen

2.2.1.1 Dämpfprozess

Ein am Institut für Holzforschung vorhandener Rohofen wurde für die Dämpfversuche extra umgerüstet. Bei dem Dämpfvorgang handelte es sich um ein indirektes Verfahren wobei das erforderliche Wasser für die Verdunstung in einer Wanne unter den Versuchsbrettern bereitgestellt wurde. Die Temperatur in der Versuchskammer selbst wurde zu Beginn jedes Versuchs, den jeweiligen Dämpfparametern entsprechend, eingestellt und nach der Aufheizphase über die gesamte Dämpfdauer konstant gehalten. Um eventuelle Nachdämpfeffekte zu vermeiden erfolgte eine Entleerung der Versuchskammer immer unmittelbar nach Ablauf der Dämpfdauer. Die entnommenen Proben wurden anschließend bei Normklima abgekühlt und für mindestens 3 Monate bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert. Anschließend erfolgte die Aufbereitung der Proben für die Farbmessungen und die zusätzlich durchgeführten Untersuchungen für die Bestimmung der Quell-/Schwindmaße.

Je Dämpfversuch wurde der umgebaute Rohofen mit jeweils 3 Probenbrettern befüllt. Die Einstapelung der Probenbretter erfolgte entweder ohne oder mit Stapellatten um Unterschiede im Dämpfen ohne bzw. mit Stapellatten aufzuzeigen.

Die Protokollierung der Holzkerntemperatur erfolgte dabei immer für das Brett in der Mitte des Stapels. Wichtig für ein gleichmäßiges Dämpfergebnis ist die Kerntemperatur an jenem Punkt, welcher von der Stapeloberfläche am weitesten entfernt ist.

2.2.1.2 UV-Stabilität

Von den gedämpften Buchenholzproben aus den vorhergegangenen Dämpfversuchen wurden von den Farbmessproben jeder Dämpfstufe Probenkörper für die künstliche UV-Bestrahlung mit 6x15 cm herausgeschnitten und gehobelt. Anschließend wurde von jeder Probe an mindestens 3 Messpunkten mit dem Farbmessgerät (CR 410) die Holzfarbe bestimmt.

Die künstliche UV-Bestrahlung erfolgte in einem Suntest CPS (Schnellbelichtungs-Tischgerät) der Fa. Heraeus bei max. Leistungstärke der Bestrahlungslampe (765 Watt/m²).

Um erste Eindrücke über die Auswirkungen der UV-Strahlung über die Zeit auf die Holzfarbe zu gewinnen wurde anfangs in einem Vorversuch je eine ungedämpfte und eine gedämpfte Buchenholzprobe (aus einer industriell durchgeführten Dämpfung) im Suntest für 24 Stunden künstlich bestrahlt. Stündlich durchgeführte Farbmessungen dienten der laufenden Dokumentation der Farbänderung durch das UV-Licht. Im folgenden Hauptversuch wurde für die Aufzeichnung über das Fortschreiten der Farbveränderung durch den Einfluss von UV-Strahlung, die Farbwerte zu Beginn der Versuchsreihe und nach 3, 6 und 24 Stunden ermittelt. Verglichen mit einer natürlichen Exposition würde dies ca. 2 Jahren im Sonnenlicht (Jahr 2002) entsprechen.

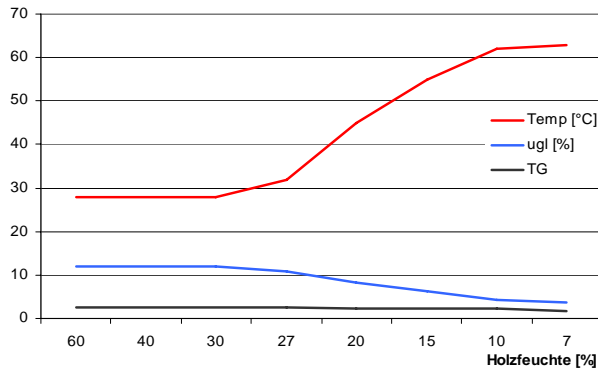
2.2.2 Versuchsablauf „Auftauen von Buchenschnittholz“

Die Versuche zum Verfärbungsverhalten von gefrorenem Buchenschnittholz wurden in der am Institut für Holzforschung (Boku, Wien) installierten Versuchstrockenkammer durchgeführt. Die Regelung der Kammer erfolgte hierbei über eine Steuerung (MB 8000) der Fa. Mühlböck, Eberschwang.

Die Probenbretter wiesen eine Holzkerntemperatur von mindestens -6 °C bis -10 °C und eine Holzanfangsfeuchte von 60-70 % auf. Die Einstellungen für das Auftauen des Holzes lagen zwischen 28 und 40 °C, mit einer Haltezeit von 2 bis 7 Stunden, bei einer Holzgleichsfeuchte (ugl) von 15 %. Die Werte für das Auftauen von Buchenschnittholz liegen in der Praxis in derselben Größenordnung. Zusätzlich wurde ein Versuch mit einer Auftautemperatur von 5 °C durchgeführt, wobei hier die Dauer des Auftauschrittes vom Erreichen einer Holzkerntemperatur von 5 °C abhängig gemacht wurde. Um Zeit zu sparen wurden immer mehrere Auftaustufen parallel, in zusätzlich zur Verfügung stehenden Klimaschränken, durchgeführt. Nach dem Auftauen wurden die Proben im Versuchstrockner zusammengeführt und auf eine Holzendfeuchte von 10 % entsprechend den Einstellungen in Abbildung 2 getrocknet.

Um das Trocknungsklima in der Kammer optimal an die aktuelle Holzfeuchte anzupassen und damit einen bestmöglichen Feuchtetransport bei akzeptablen Trocknungsspannungen zu ermöglichen, wird als empirischer Wert das Trocknungsgefälle (TG) verwendet.

TG = mittlere Holzfeuchte / Kammerklimaausgleichsfeuchte



Holzfeuchte [%]	Temp [°C]	ugl [%]	TG
60	28	12	2,5
40	28	12	2,5
30	28	12	2,5
27	32	10,8	2,5
20	45	8,2	2,4
15	55	6,4	2,3
10	62	4,4	2,3
7	63	3,8	1,8

Abbildung 2: Trocknungsschema für die Buchenschnittholztrocknung nach der Auftauphase

Als Farbreferenz für die Proben der Auftauversuche dienten Messwerte von Brettern, welche unmittelbar nach der Probennahme bei Normklima gelagert wurden. Durch die niedrige Temperatur von 20 °C wurde gewährleistet, dass durch die Trocknung im Klimaraum keine Verfärbungen in Folge hoher Trocknungstemperaturen auftreten.

Sowohl die Probenbretter für die Referenzwerte, als auch jene aus den Auftauversuchen wurden bei einer durchschnittlichen Holzfeuchte von 10 % gehobelt und anschließend an der Oberfläche die Holzfarbe mit dem Farbmessgerät ermittelt.

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Buchenschnittholzdümpfung

Im Rahmen der Dämpfversuche wurde untersucht, bei welchen Bedingungen (Temperatur und Dauer), welcher Farbton mit einer möglichst gleichmäßigen Verteilung erreicht werden kann. Der Versuchsplan für die Untersuchungen des Einflusses der einzelnen Parameter (Stapelart, Dauer, Temperatur, Aufheizgeschwindigkeit) sah vor, dass die Dämpfbedingungen sich an den in der Industrie üblichen Einstellungen orientierten. Als Vergleichsmaterial dient jeweils ungedämpftes Rotbuchenholz.

Es wurden Versuchsreihen mit 80 und 100 °C durchgeführt, wobei die Haltezeiten jeweils von 10 bis 60 Stunden variiert wurden. Bei einer Dämpftemperatur von 100 °C nimmt mit zunehmender Haltezeit die starke Abtrocknung der Bretter zu und damit einhergehend treten vermehrt Risse und Verzugsprobleme der Proben auf.

Mit zunehmender Temperatur bei gleicher Haltezeit lässt sich eine intensivere Färbung des Holzes erreichen. Eine zusätzliche Veränderung der Farbe kann jedoch auch durch unterschiedlich lange Haltezeiten bei geringerer Temperatur erreicht werden. Niedrigere Temperaturen mit längeren Haltezeiten führten bei gleicher Endfarbe der Proben zu geringeren Rissproblemen. Der geringeren Rissbildung und somit Holzverlusten steht eine längere Dämpfdauer gegenüber. Für die unterschiedlichen Dämpfparameter wurden für die Versuchsreihen die Helligkeit der Oberflächen sowie die Farbwertanteile miteinander verglichen. Die folgende Abbildung 3 zeigt die Messwerte für die Helligkeit und jeweils den Farbwertanteil in den Dämpfstufen. Als Referenz sind die Farbwerte für ungedämpfte Buche (28-0) mit aufgeführt.

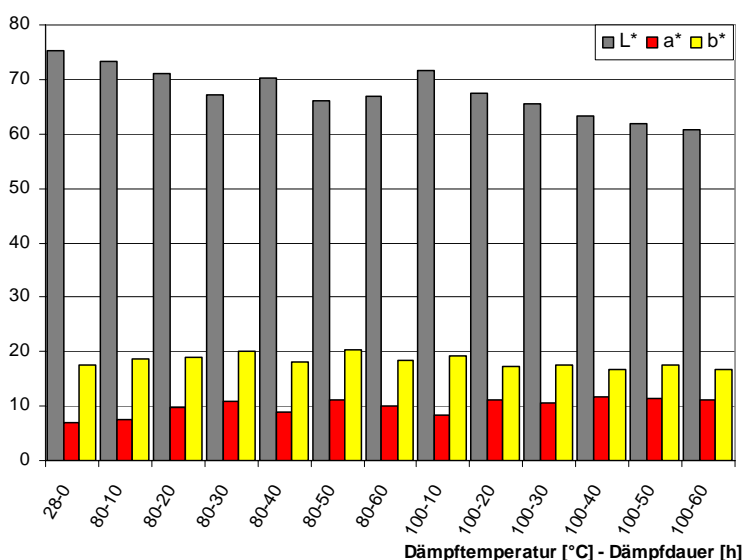


Abbildung 3: L*a*b*-Farbwerte für gedämpftes Buchenschnittholz

Es zeigt sich, dass sich bei einer Dämpftemperatur von 100 °C mit zunehmender Dauer vorwiegend der Helligkeitswert (L*) verringert. Die Rot- und Gelbanteile der Versuchsproben schwanken bei gleicher Temperatur immer um Werte gleicher Größenordnung. Zum Erzielen gleicher Endfarbe bei Verwendung einer Temperatur von 80 °C muss die Haltezeit um ca. 10 Stunden verlängert werden. Auffällig hierbei ist jedoch die stärkere Streuung der Endfarben. Somit führt eine höhere Temperatur zu einer deutlich stärkeren Vergleichmäßigung der Holzfarbe als das Dämpfen bei geringerer Temperatur.

Tabelle 2: L*a*b*-Farbwerte der einzelnen Dämpfstufen

Temperatur [°C]	Dämpfdauer [h]	L*	a*	b*
Referenz		75,24	6,96	17,51
80	10	73,29	7,39	18,64
80	20	71,02	9,72	18,98
80	30	67,04	10,80	20,03
80	40	70,16	8,88	18,14
80	50	66,12	11,11	20,27
80	60	66,84	10,06	18,42
100	10	71,61	8,34	19,10
100	20	67,57	11,11	17,36
100	30	65,45	10,58	17,46
100	40	63,33	11,77	16,81
100	50	61,93	11,50	17,63
100	60	60,69	11,10	16,75

Die aus den Versuchen resultierenden Farbmuster repräsentieren weitestgehend das in der Holzindustrie nachgefragte Farbspektrum für Buche (Tabelle 2, Abbildung 3). Je nach Anwendungsbereich und Kundenwunsch ist aufgrund der angeführten Werte für die Dämpftemperatur und -dauer eine Reproduzierbarkeit gegeben. Leichte Anpassungen können unter Umständen erforderlich sein, da aufgrund der Variationen der Dämpfkammerbauarten eine Optimierung immer speziell für eine einzelne Kammer erfolgen muss.

2.3.1.1 Holzkerntemperatur - Durchwärmzeit

Die Versuchsbretter, die bei 80 °C für 20 Stunden und bei 100 °C für 10 bzw. 20 h gedämpft wurden wiesen alle eine ungleichmäßige streifige und zum Teil fleckige Färbung auf (Abbildung 4). Vergleichend wurden Versuche mit gefrorenen Buchenproben durchgeführt. Die zu Beginn der Versuche geringere Holzkerntemperatur wurde jedoch innerhalb der gleichen Zeitdauer wie jene der bereits aufgetauten Bretter angehoben (Abbildung 5). Bei den Brettern, die einer rascheren Durchwärmung unterlagen, konnten die zuvor erwähnten ungleichmäßigen Verfärbungen der Buchenproben nicht festgestellt werden.



Abbildung 4: Farbstreifen aufgrund ungleichmäßiger Buchendämpfung

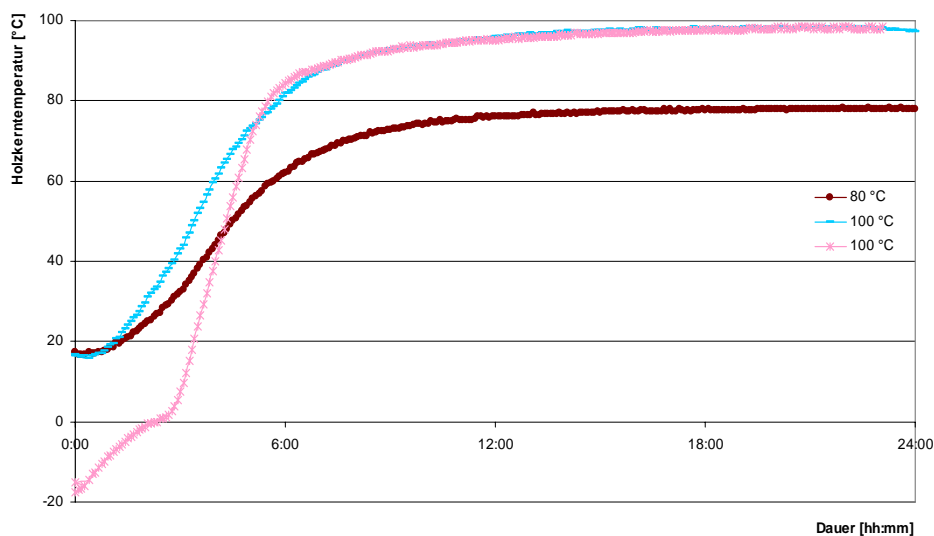


Abbildung 5: Verlauf der Holzkerntemperatur bei Buche in Abhängigkeit von der Aufheiztemperatur

Parallel zu den Laborversuchen wurden auch Bucheschnittholzproben einer Industriedämpfung entnommen, die mit Paketen im Block, als auch mit einigen gelatteten Versuchspaketen beschickt worden war. Das Stapeln der Buchenbretter auf Latten führt bei der Dämpfung zu einer rascheren Durchwärmung des gesamten Holzes. Abbildung 6 zeigt die Farbwerte für Buchenbretter unterschiedlicher Stärke, die für die Dämpfung unterschiedlich eingestapelt wurden. Zu erkennen

ist die hellere Farbe der auf Latten gelegten Bretter. Dies kann damit begründet werden, dass einerseits die Durchwärmgeschwindigkeit der Bretter höher lag als bei den ungelatteten. Andererseits erfolgt nach Entleerung der Kammer eine raschere Abkühlung der Bretter, wodurch der Effekt des Nachdämpfens deutlich reduziert wird. Für die Erzielung heller Farbtöne ist diese Methode durchaus empfehlenswert.

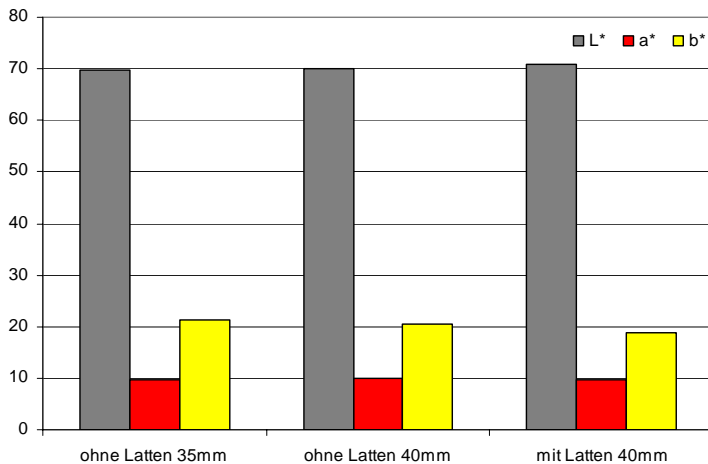


Abbildung 6: L*a*b*-Farbwerte von mit bzw. ohne Stapellatten gedämpftem Buchenschnittholz

Ein Nachstellen der gleichen Bedingungen (gestapelt bzw. ungestapelt) in der Labordämpfkammer führten im Gegensatz zu den Versuchen im Industriemaßstab zu keinen erkennbaren unterschieden in der Farbe. Ursache dürften die zu geringen Probenabmessungen und damit einhergehend sehr kleine Brettstapel sein. Dadurch ergeben sich in der Durchwärmzeit keine sich deutlich auswirkenden Unterschiede.

2.3.1.2 Holzfeuchteverteilung

Die Proben des frischen Buchenholzes hatten vor den Dämpfversuchen eine durchschnittliche Holzanfangsfeuchte von 70 %. Das Dämpfen führt erwartungsgemäß zu einer Abtrocknung und Vergleichmäßigung der Holzfeuchte. Die Feuchtigkeitswerte nach den Versuchen lagen im Bereich von 40 bis 50 %. Es konnte festgestellt werden, dass im Rahmen der gewählten Dämpfdauern mit zunehmender Haltezeit sich starke Holzfeuchteunterschiede deutlich abbauen. Zusätzlich führt eine höhere Dämpftemperatur zu einer geringfügig stärkeren Abtrocknung wie dies beim gemeinsamen Betrachten von Abbildung 7 und Abbildung 8 zu sehen ist. Im Vergleich zur üblichen technischen Trocknung ergaben sich in Anbetracht der relativ kurzen Verweilzeiten in der Dämpfkammer beachtliche Trocknungseffekte.

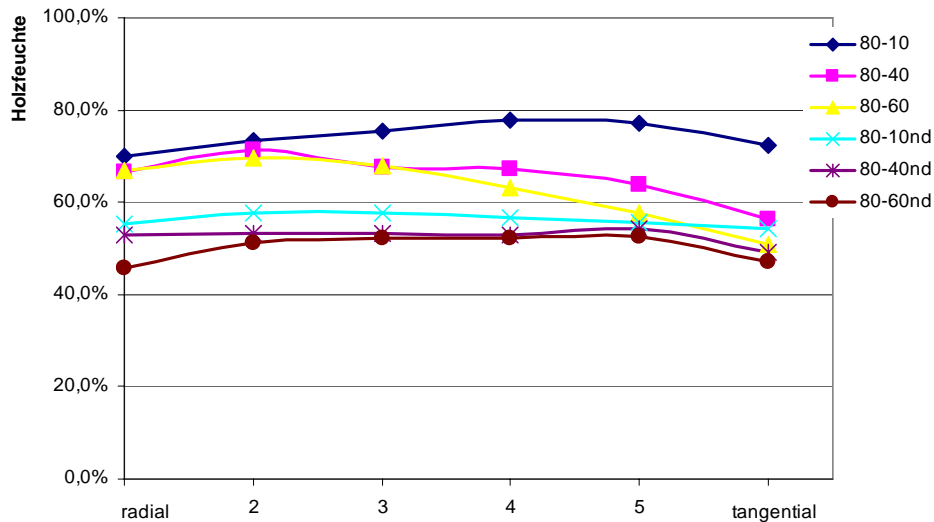


Abbildung 7: Holzfeuchteverteilung von Buche vor und nach (nd) der Dämpfung bei 80 °C

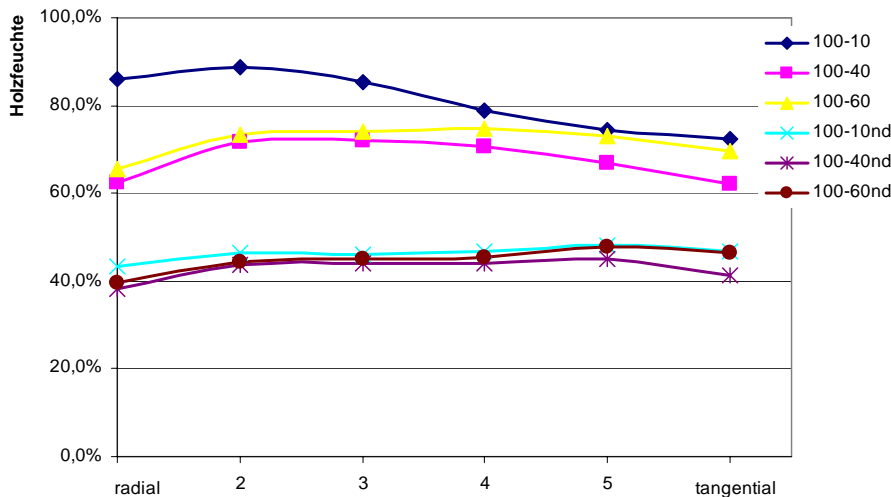


Abbildung 8: Holzfeuchteverteilung von Buche vor und nach (nd) der Dämpfung bei 100 °C

2.3.1.3 UV-Stabilität

Neben einer Quellungsvergütung durch das Dämpfen wurde ebenfalls eine Stabilisierung der Holzfarbe gegenüber UV-Strahlung untersucht. Besonders für die Möbelindustrie, welche großen Wert auf das äußere Erscheinungsbild der Produkte legen muss, ist die Lichtechtheit von großer Bedeutung. Unter Lichtechtheit versteht man die Beständigkeit von Farben gegenüber der Einwirkung von Licht und Strahlung im UV-Bereich. Die Absorption von Licht und Strahlung im UV-Bereich löst photochemische Prozesse aus, die zu Farbveränderungen – dem sogenannten „Ausbleichen“ – führen. Feuchtigkeit besitzt in diesem Zusammenhang einen katalytischen Effekt beim Ausbleichen der Holzoberflächen. Dieser Vorgang ist auf die Bildung von Peroxyden durch Autooxidationsprozesse bei der UV-Bestrahlung von organischen Materialien in Gegenwart von Wasser zurückzuführen. Die Peroxyde bewirken ihrerseits den Abbau der organischen Farbstoffe.

Durch künstliche Bestrahlung mit UV-Licht kann die Vergilbung von Holz beschleunigt werden. Mittels einer derartigen künstlichen Bestrahlungseinrichtung für Laborversuche der Fa. Heraeus wurden die zuvor gedämpften Buchenproben auf ihre Lichtechtheit geprüft. Abbildung 9 zeigt an einer ungedämpften und an einer gedämpften Probe die fortschreitende Farbveränderung durch UV-Strahlung. Die zugehörigen $L^*a^*b^*$ -Farbwerte können Abbildung 10 entnommen werden. Gedämpfte Buche vergilbt schwächer als ungedämpfte, was sich in den ΔE -Werten widerspiegelt. Das nach den einzelnen Bestrahlungsdauern errechnete ΔE bezieht sich jeweils auf den Farbwert in nicht bestrahltem, also nicht verfärbtem Zustand. Für gedämpfte Buche beginnt das ΔE bereits nach ca. 9 h UV-Bestrahlungszeit asymptotisch auszulaufen, während bei ungedämpfter Buche auch nach 24 h noch keine merkliche Abschwächung des Vergilbungsprozesses zu erkennen ist.

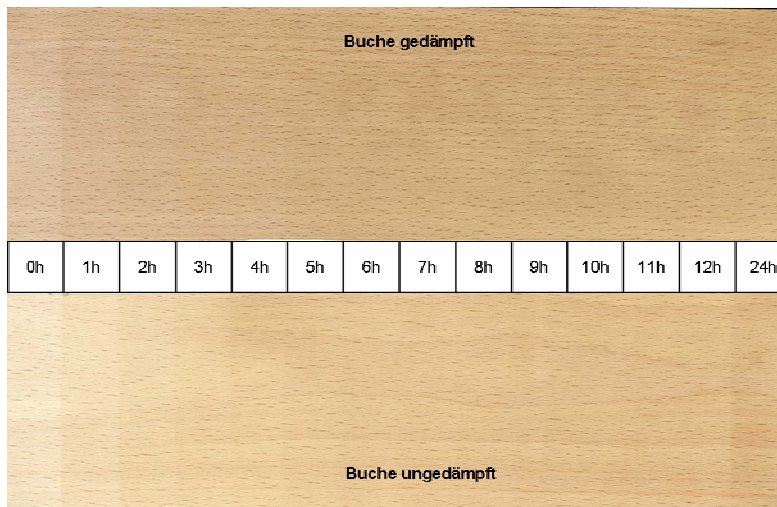


Abbildung 9: Farbvergleich nach UV-Bestrahlung: oben Buche gedämpft, unten Buche ungedämpft

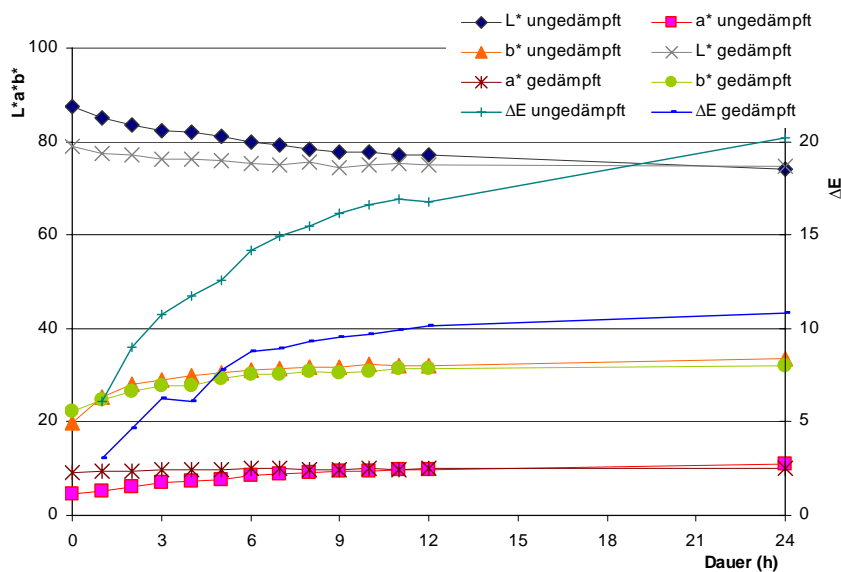


Abbildung 10: Änderung der Holzfarbe bei (un-)gedämpftem Buchenschnittholz durch UV-Bestrahlung

2.3.1.4 Quell- und Schwindmaße

Mit den Quell- und Schwindversuchen wurde eine mögliche Quellungsvergütung des Buchenholzes ermittelt. Es sollte untersucht werden, ob durch das Dämpfen ein Vergütungseffekt erzielt werden konnte.

Die Untersuchungen gemäß DIN 52184 wurden mit Proben aller Behandlungsstufen durchgeführt. Zum Vergleich wurden die Messwerte für ungedämpftes Buchenholz ermittelt.

Durch die Veränderung der Hygroskopizität des Holzes durch das Dämpfen wird das Quell- und Schwindverhalten verringert oder zumindest zeitlich verzögert. Mit zunehmender Dämpftemperatur und -dauer wird somit eine Quellungsvergütung von Holz erreicht. Anzunehmen ist, dass durch Hydrolyse von Holzbestandteilen beim Dämpfen frischen Buchenholzes diese Vergütung erzielt wird.

Aus Abbildung 11 kann das differentielle Quellmaß in [%/%] für Buche entnommen werden. Bei Verwendung einer Dämpftemperatur von 80 °C kann keine Quellungsvergütung erreicht werden. Dämpftemperaturen ab 100 °C führen mit zunehmender Dauer zu einer signifikanten Verringerung des Quellungsverhaltens. Für das Stattfinden von Hydrolysevorgängen im Holz ist somit eine Mindesttemperatur von rund 100 °C erforderlich.

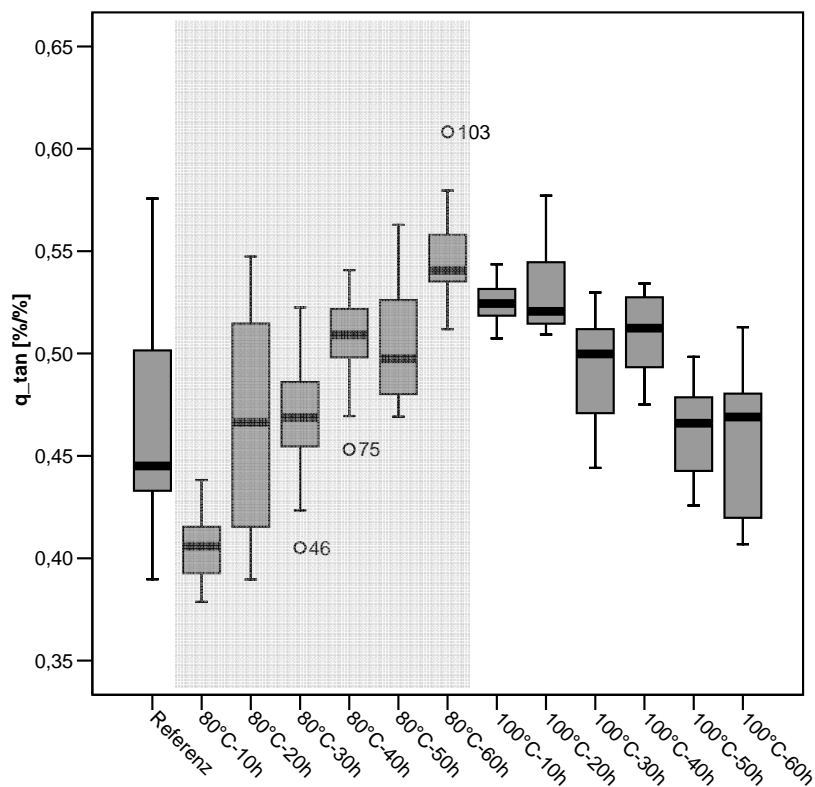


Abbildung 11: Differentielle Quellung für Buche

2.3.2 Auftauen von Buchenschnittholz

Da das Buchenschnittholz in Mitteleuropa heute nicht mehr nur in der kalten Jahreszeit in den Sägewerken verarbeitet wird, kann es häufig vorkommen, dass besonders in den Übergängen von den kalten zu den warmen Jahreszeiten das Schnittholz mit stark unterschiedlicher Holztemperatur in die Trockenkammern eingebracht wird. Um nicht bereits in der Aufheizphase Schäden durch Verfärbung am Schnittholz infolge falsch gewählter zeitlicher Temperaturerhöhung zu verursachen ist es erforderlich auch die Farbveränderungen des Holzes während des Auftauprozesses zu kennen.

Das Vorliegen von Erfahrungswerten aus der Industrie ermöglicht eine deutliche Einschränkung der beiden Hauptparameter Temperatur und Zeit.

Bei Temperaturerhöhung gemäß dem erstellten Versuchsplan ergaben sich messtechnisch aber auch visuell unterscheidbare Farbwerte. Der rötliche Ton der Buche, welcher durch Dämpfen sehr deutlich zum Ausdruck kommt, bestimmt auch bei den Auftauversuchen von gefrorenem Buchenschnittholz die Farbe.

Das Schnittholz verhält sich beim Auftauen ähnlich wie beim Dämpfen. Eine Erhöhung der Auftautemperatur und eine Verlängerung der Auftauzeit bewirken eine Veränderung der Farbe zu einem etwas dunkleren Farbton mit geringerer Helligkeit (Abbildung 12). Trotz der hohen Ausgleichsfeuchtigkeit während der Phase des Auftauens in der Kammer kommt es bei den höheren Auftautemperaturen zu einer stärkeren Abtrocknung der Brettrandzonen. Dieses rasche oberflächliche Trocknen führt zu deutlich hellerer Holzfarbe dieser Bereiche. Im Kern jedoch stellt sich bei den höheren Auftautemperaturen (40 °C) eine rötlichere Farbe der Buche ein (Abbildung 13). Auftaubedingungen von 5 °C ermöglichen das Erhalten des sehr hellen Farbtons der Buche. Nachteil bei den niedrigen Temperaturen liegt in der länger andauernden Auftauphase bis zum Erreichen einer Holzkerntemperatur deutlich über 5 °C.

Verzug und Rissbildung der Proben konnte bei den durchgeführten Versuchen mit einer maximalen Haltezeit der Temperatur von 7 Stunden nicht festgestellt werden. Auch eine mögliche Verschalung, die sich auf die anschließende Trocknung negativ in Hinblick auf den Trocknungsfortschritt ausgewirkt hätte trat nicht ein.

In jedem Fall gilt um hohe Qualität zu erreichen, dass ein Auftauen von gefrorenem Buchenschnittholz bei niedrigen Temperaturen möglichst schonend durchgeführt werden sollte.

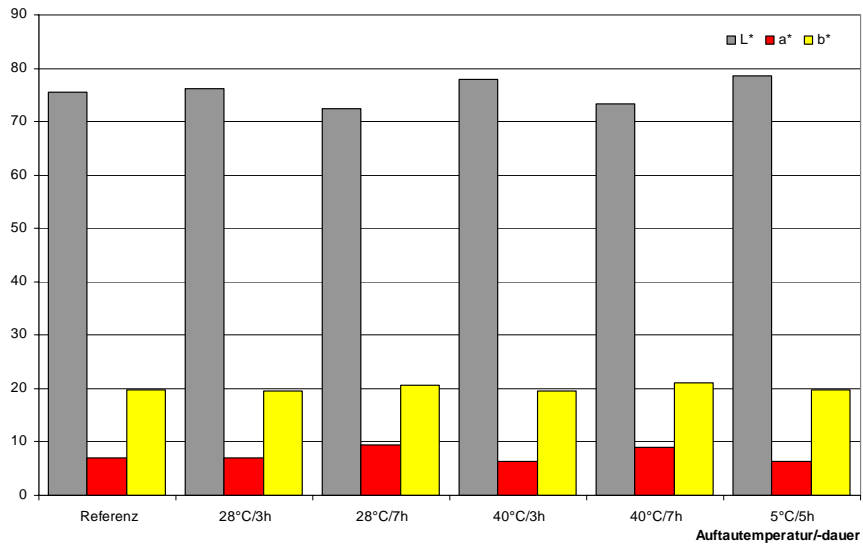


Abbildung 12: L*a*b*-Farbwerte von Buche nach dem Auftauen



Abbildung 13: Farbmuster Buche nach dem Auftauen bei 40 °C für 7 h (Brettschmalseite)

3 ERLE (*Alnus glutinosa* Gaertn.)

Ein Trocknungsfehler im allgemeinen Sinne ist nach WARD (1999) jedes Charakteristikum oder Makel in einem Holzprodukt, das während der Trocknung auftritt und eine Wertminderung des Produktes und somit ein großer Kostenfaktor darstellt. Farbveränderungen können somit, wenn sie unerwünscht auftreten als Trocknungsfehler eingestuft werden. Umgekehrt kann Farbänderung während der Trocknung auch vom Verarbeiter gewünscht sein und wird nicht als Fehlerscheinung interpretiert.

Für Farbänderungen aufgrund chemischer und enzymatischer Reaktionen neigen besonders Laubhölzer zu oxidativen Oberflächenverfärbungen. In einigen Laubholzarten wie beispielsweise Erle treten intensive Verfärbungen schon innerhalb kürzester Zeit auf nachdem die frische Schnittfläche dem Kontakt mit Sauerstoff ausgesetzt wird. Der englische Name für die Erle – "red alder" – ist auf die rötlich-orange Farbe von frisch geschnittenem Erlenholz zurückzuführen. Diese rasche Farbbildung wird durch die chemische Komponente „Oregonin“ verursacht, wenn die frisch angeschnittenen Zellen mit Sauerstoff in Berührung kommen. Die Verfärbungen an frisch geschnittenen Oberflächen kann normalerweise durch einfaches abhobeln entfernt werden (ALLEN 1996).

BRANDSTÄTTER (1987) beschäftigte sich in seiner Diplomarbeit bereits mit der Idee einer kurzzeitigen Erwärmung von Erlenholz auf 90 bis 105 °C um Enzyme und eventuell andere reaktive Komponenten durch den Energieeintrag auszuschalten und somit eine einheitliche, wenn auch etwas dunklere Farbe, zu erreichen. Aus nicht nachvollziehbaren Gründen kamen seine Ergebnisse in der Industrie nie zur Anwendung.

ANDERSON und FRASHOUR (1954) führten leichte Dämpfversuche an amerikanischer Roterle durch. Inwieweit sich diese Ergebnisse auf die europäische Schwarzerle überführen lassen sollen eigene Versuche zeigen. Vorteil wäre, dass die angeführten Dämpfbedingungen auch in einer konventionellen Frischluft/Abluft Trockenkammer erreicht werden könnten.

3.1 Zielsetzung

Das Verfärbungsverhalten von Erlenschnittholz im Zuge des Trocknungsprozesses (natürlich/technisch) und die Ursachen hierfür waren Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojekts. Ein Eingrenzen der Hauptfaktoren sollte ermöglichen, dass zukünftig Erlenschnittholz auf eine bestimmte Zielfarbe hin technisch getrocknet werden kann. Um neben den physikalischen Einflussparametern (Temperatur, Holzfeuchte, Zeit) auch Veränderungen der chemischen Holzzusammensetzung im Laufe der Trocknung – folglich im Zuge der Verfärbung – zu erlangen, wurden Holzinhaltsstoffanalysen und shigometrische Messungen (Leitfähigkeitsmessungen einer Holz/Wasser Suspension) durchgeführt.

Mit den gewonnenen Proben sollte zusätzlich eine Farbkartei mit der möglichen Farbpalette von Erlenschnittholz erstellt werden. An ausgewählten Proben unterschiedlich starker Farbänderung wurde zusätzlich die höhere UV-Stabilität der Farbe von getrockneten Erlenschnittholzbrettern mittels künstlicher UV-Bestrahlung aufgezeigt.

Um den Bedarf an Erlenschnittholz für die Möbelindustrie ganzjährig abdecken zu können, erfolgt der Einschlag der Bäume unabhängig von der Jahreszeit kontinuierlich über das ganze Jahr. Da es für die gezielte Farbveränderung unumgänglich ist, dass Erlenschnittholz frisch (mit mehr als 30 % Holzfeuchte in die Trockenkammern kommt) wurde die Möglichkeit einer Wasserlagerung vor der Trocknung von Erlenholz untersucht.

Auch kann die unterschiedliche Holzinhaltsstoffzusammensetzung während der einzelnen Jahreszeiten für das Verfärbungsverhalten von entscheidender Bedeutung sein. Somit war es erforderlich auch diesen Einflussparameter zu betrachten.

Für die Steuerung einer gezielten Farbgebung ist es erforderlich direkte bzw. indirekte Informationen über die aktuelle Holzfarbe während des Trocknungsprozesses kontinuierlich zu erhalten. Hierfür wurde bei einer Erlenversuchstrocknung der eventuelle zukünftige Einsatz eines Onlinefarbmesssystems geprüft.

3.2 Material und Methode

Für die Versuchsreihen mit der Holzart Erle wurde luftgetrockenes und sägefrisches Schnittholz (Holzfeuchte ~20 % bzw. >50 %) von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt. Es wurden Vorversuche mit Brettern von 26 bis 42 mm Stärke durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass der Schwerpunkt auf die stärkere Ware gelegt werden muss, da an diesen Brettprofilen Farbvariationen sowohl häufiger als auch deutlicher auftreten. Die Abmessungen des Frischluft/Abluft (F/A) Labortrockners an der Universität für Bodenkultur Wien lassen eine Verwendung von Brettern bis 50 cm Länge zu.

Das verwendete Probenmaterial stammte sowohl aus Polen, als auch aus Ungarn. Untersuchungen früherer Projekte haben gezeigt, dass das Herkunftsland (und somit auf der forstliche Standort) auf das Verfärbungsverhalten von Erlenschnittholz keinen signifikanten Einfluss hat. Aus diesem Grund wurde für dieses Projekt dieser Parameter nicht weiter berücksichtigt und die Proben stichprobenartig willkürlich entnommen.

3.2.1 Versuchsablauf „Erlenversuchstrocknung“

Für die Trocknungsversuche im F/A-Laborversuchstrockner an der Universität für Bodenkultur in Wien wurden sägefrische (Holzfeuchte ≥ 50 %) Erlenbretter, welche nach der Probennahme nicht länger als ein bis zwei Tage in einem Kühlraum bei ca. 8 °C zwischengelagert wurden verwendet. Für den Vergleich mit an der Luft vorgetrockneten Brettern erfolgte die Beschickung der Trockenkammer je nach Versuchsablauf sowohl mit frischen, als auch mit luftgetrockneten besäumten Probenbrettern.

Gemäß den Bestimmungen der ÖNORM EN 13183-1 wurden vor und nach der Trocknung stichprobenartig Darrriegel von 20 mm in Längsrichtung entnommen. Die Bestimmung der Holzfeuchte erfolgte nach der Darmmethode. Zusätzlich zur mittleren Holzfeuchte der Trocknungscharge wurden an mindestens zwei Probenbrettern vor und nach der Trocknung Feuchteprofilproben entsprechend Abbildung 14 gezogen. Durch Mittelung der einzelnen Holzfeuchtwerte der untersuchten Proben ergibt sich die durchschnittliche Holzfeuchte einer Charge.

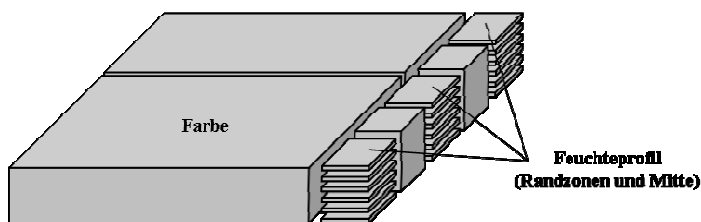
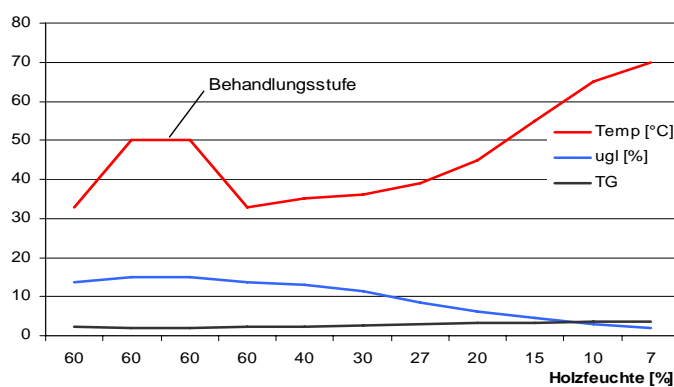


Abbildung 14: Schnittmuster für die Untersuchungen an Erlenbrettern

Auf Grund der Kürze der Bretter (50 cm) musste das holzanatomisch bedingte zu rasche Abtrocknen über die Brettenden verhindert werden. Dies ist erforderlich um das Verhalten größerer Brettdimensionen in der Praxis nachzustellen. Zu diesem Zweck wurden die Stirnflächen (Querschnitt) mit handelsüblichem wasserfestem Weißleim und Kunststoffklebeband versiegelt.

Wie von anderen Versuchen bekannt ist lässt sich mit zunehmender Temperatur bei gleicher Haltezeit eine intensivere Färbung des Holzes erreichen. Auch eine längere Haltezeit bei hoher Luftfeuchte und geringerer Temperatur kann einen ähnlichen Effekt bewirken.

Für die Versuchstrocknungen wurde das bestehende Trocknungsprogramm der Fa. Alfa (Erlenschnittholzverarbeitender Industriepartner aus der Möbelzulieferindustrie) zunächst für einen direkten Vergleich zwischen Labortrockner und Industrietrockner eingesetzt (Abbildung 15). Nach dieser Verifikation der Vergleichbarkeit zwischen Industrie- und Laborversuchen wurde auch für die weiteren Versuchsreihen das bereits bestehende Programm in leicht modifizierter Form verwendet. Dies auch in Hinblick darauf, dass der zukünftige Einsatz der entwickelten Trocknungsprogramme in der Industrie direkt erfolgen kann.



Holzfeuchte [%]	Temp [°C]	ugl [%]	TG
~60	Behandlungsstufe xy		
60	33	13,6	2,2
40	35	13	2,3
30	36	11,5	2,6
27	39	8,3	3,0
20	45	6,2	3,2
15	55	4,4	3,4
10	65	2,8	3,6
7	70	2,0	3,5

Abbildung 15: Erlenschnittholz Trocknungsprogramm (schematisch)

Im Rahmen der Versuchstrocknungen zur Optimierung der hygrothermischen Holzmodifikation in Hinblick auf die Farbe mussten die Holz Trocknungsparameter der Behandlungsstufe (Temperatur und Dauer) in der Anfangsphase der Trocknung variiert werden. Die kurzzeitige Energieeinbringung während der Modifizierungsphase erfolgte für die Gewährleistung der Vergleichbarkeit jeweils bei ca. 60 % Holzfeuchte.

Tabelle 3: Behandlungsstufen für die Erlenversuchstrocknungen

Behandlungsnr.	Temp [°C]	Dauer [h]	ugl [%]
1	40	32	15
2	50	32	15
3	50	40	15
4	50	40 mit Enzym- behandlung	15
5	95	5	15

Beim Behandlungsverfahren Nr. 4 gemäß Tabelle 3 wurden die Probenbretter zusätzlich mit dem Enzym Laccase oberflächlich behandelt, um den Einfluss von Enzymen auf den Farbgebungsprozess nachzuweisen.

Für die Behandlung mit Laccase wurden jeweils frische als auch trockene Erlenbretter oberflächlich gehobelt und mit einer gepufferten Laccaselösung [1 bzw. 10 U/ml Laccase, Succinatpuffer 10 mM, pH 5) besprüht. Als Referenz dienten frische unbehandelte Oberflächen von Erlenbrettern, welche mitgetrocknet wurden. Zusätzlich wurde die Hälfte der Probenbretter an der gehobelten Oberfläche mit einem Enzymhemmer (Azid) besprüht. Im Anschluss an diese Probenpräparation erfolgte die Behandlung im Versuchstrockner mit der unmittelbar anschließenden Trocknung.

Die Farbmessungen der getrockneten Proben erfolgte an gehobelten Oberflächen mit dem Farbmessgerät Chroma-Meter CR 410 der Fa. Minolta für einen 2°-Normbeobachter bei Tageslicht D65. Je Probe wurde die Farbe an mindestens 6 Punkten bestimmt und anschließend gemittelt.

3.2.1.1 UV-Stabilität

Von den Farbmessproben der unterschiedlich behandelten Erlenholz Bretter wurden einige Proben für weitere Versuche zum Thema UV-Stabilität entnommen.

Die künstliche UV-Bestrahlung für 24 Stunden erfolgte in einem Suntest CPS (Schnellbelichtungs-Tischgerät) der Fa. Heraeus bei max. Leistungsstärke der Bestrahlungslampe (765 Watt/m²) ohne Einsatz eines Filters.

Die Auswirkung der UV-Strahlung über die Zeit auf die Holzfarbe der unterschiedlich behandelten Proben wurde mittels stündlich durchgeführter Farbmessungen laufend dokumentiert. Die Farbmessungen erfolgten aufgrund der geringen Probendimensionen mit einem Spektralphotometer Codec 400 der Fa. Phyma. Die Messfleckgröße betrug 8 mm, wobei der 2°-Normbeobachter bei Verwendung der Lichtart D65 verwendet wurden. Durch die Bestimmung von 3 Messwerten an der gehobelten Holzoberfläche nach jeder Stunde für die Mittelwertbildung konnte dem Einfluss der Holzstruktur Rechnung getragen werden.

3.3 Ergebnisse

Ausgehend von vorliegenden Farbmustern für die Farbsortierung von hell bis dunkel in der industriellen Produktion wurde in einem ersten Schritt eine Farbkartei erstellt. Einerseits diente dies einer zahlenmäßigen und somit objektiven Erfassung der vereinbarten Farbvorgaben, andererseits war es durch diesen Arbeitsschritt möglich Untersuchungen und Erfolgsfortschritte in Hinblick auf die gezielte Farbgebung an konkreten Zielen zu messen. Eine feinere Einteilung des möglichen Farbspektrums von Erlenholz ist nicht zielführend, da ansonsten der Sortieraufwand übermäßig ansteigen würde und auch seitens der hygrothermischen Holzmodifikation eine dermaßen starke Farbhomogenisierung nicht möglich wäre. Die natürliche Struktur des Werkstoffes Holz verlangt im Gegensatz zu technisch hergestellten Produkten eine Akzeptanz größerer Toleranzen in der Beurteilung der Farbe. Die subjektiv empfundene Zunahme der Farbgebung (Dunkelheit) von Muster 1 auf Muster 6 wird auch in den Messwerten deutlich sichtbar. Die grafische Darstellung der einzelnen Farbwerte in Abbildung 16 zeigt eine deutliche Abnahme der Helligkeitswerte und gleichzeitig aber eine Zunahme des Rotanteils. Muster 7 wurde auf Wunsch des Firmenpartners ebenfalls miterfasst, da es sich hierbei um die Zielfarbe für einen Hauptkunden des Betriebs handelt. Die Farbwerte selbst decken sich annähernd mit jenen von Muster 4 und 5.

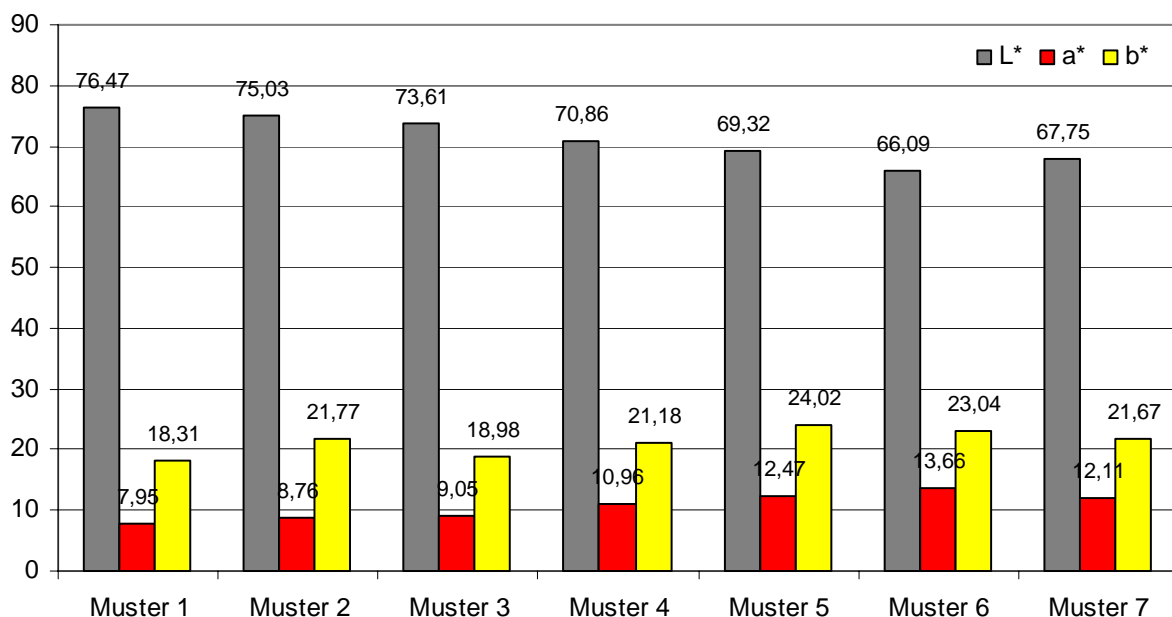


Abbildung 16: L*a*b*-Farbwerte der Erlenfarbmuster

3.3.1 Vergleich Industrie- mit Labortrockner

In einem der ersten Trocknungsversuche wurden Erlenholz-Bretter mit einer Stärke von 26 mm sowohl in der Industrietrockenkammer des Firmenpartners, als auch im Versuchstrockner der

BOKU Wien mit gleichem Trocknungsprogramm getrocknet. Abbildung 17 zeigt die sehr ähnlichen Endfarbwerte der im Labor- als auch im Industrietrockner getrockneten Erlenbretter.

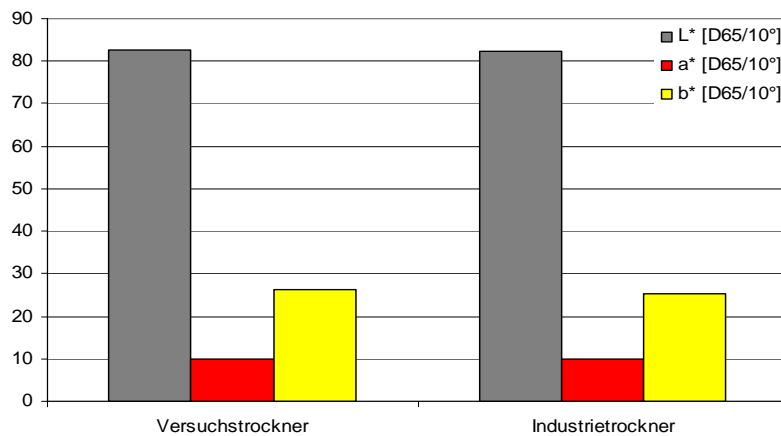


Abbildung 17: Farbwertevergleich zwischen Industrie- und Labortrockner

Die bei einer Endfeuchtigkeit von 10 % auf Farbe gemessenen Bretter aus dem Labortrockner und jene aus der Industrietrockenkammer wiesen die gleiche Farbe auf. Für die zukünftigen Versuche galt somit, dass die im Labor erarbeiteten Trockenprogramme mit eventuell leichten Modifikationen auch in der Industriekammer ohne Probleme umgesetzt werden können. Leichte Abänderungen sind nur aufgrund des größeren Kammervolumens erforderlich. Die unterschiedlichen Größen bewirken, dass vor allem große Trockenkammern auf eine Änderung des Kammerklimas träger reagieren als dies im Labortrockner der Fall ist. Deutliches Indiz hierfür liefern die Auswertung von Trocknungsprotokollen und der Vergleich der Trockenzeiten zwischen den Trockenkammern. Die Dauer der Holz Trocknung ist immer in Zusammenhang mit der Holzanfangsfeuchte zu sehen.

Da aufgrund der bisherigen Ergebnisse eine deutliche Veränderung der Holzfarbe nur bei einer Holzfeuchtigkeit über 30 % möglich ist, wurde dieser Aspekt noch einmal gleichzeitig mit dem Industrie-/Labortrocknervergleich überprüft und konnte bestätigt werden. Farbwerte wurden für Proben bei einer durchschnittlichen Holzfeuchte von ~16 % ermittelt. Die Abtrocknung dieser Bretter am Schnittholzlagerplatz war bereits so weit fortgeschritten, dass im Zuge der technischen Konvektionstrocknung keine Einflussnahme auf die Farbe mehr möglich war. Deutliche Unterschiede zwischen den Farbwerten von an der Freiluft vorgetrockneten Ware und frisch getrockneter Ware (Holzfeuchte >30 %) zeigen sich vor allem im Helligkeitswert und dem Rotanteil (Abbildung 18). Leichte Farbunterschiede zwischen den Werten vor und nach der technischen Trocknung von vorgetrockneten Brettern können auf den Einfluss des Wassers auf die Lichtreflexion zurückgeführt werden.

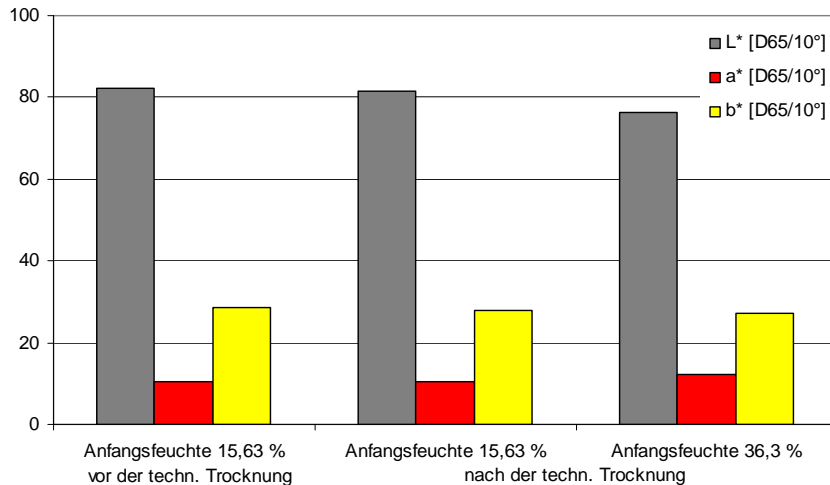


Abbildung 18: Einfluss der Freiluftvortrocknung für die weitere Farbmodifikation

3.3.2 Onlinefarbmesssystem

Es wurde ein Trocknungsversuch mit 32 mm starken Erlen-Brettern durchgeführt. Hierbei erfolgte stündlich während der gesamten Trocknungszeit, an zu Beginn der Trocknung gehobelten Oberflächen und markierten Messpunkten, eine Farbmessung der Probenbretter. Es wurde das vorhandene CIE L*a*b* Farbmesssystem (Codec 400 der Fa. Phyma) der Universität für Bodenkultur verwendet. Durch das stündliche Öffnen der Tore kam es zu Störungen des Kammerklimas. Aus diesem Grund konnte das vorgesehene Trocknungsschema nicht kontinuierlich eingehalten werden. Das Trocknungsgefälle war deutlich größer als vorgesehen und somit auch die Abtrocknungsgeschwindigkeit des Holzes.

Bei der Online-Farbmessung besteht generell das Problem der Trennung zweier parallel ablaufender Prozesse, nämlich der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Farbe (Wasser im Holzgefüge verursacht eine unterschiedliche Reflexion), und Farbveränderungen durch biochemische Prozesse im Holz.

Die starken Veränderungen der Farbe bis ca. 30 % Holzfeuchte können auf ein starkes Abtrocknen aber auch auf biochemische Reaktionen bei noch ausreichender Feuchtigkeit des Holzes zurückgeführt werden, danach findet kaum ein Fortschreiten des Verfärbungsprozesses statt (Abbildung 19).

Zusätzlich findet zu den erwähnten zwei Prozessen in Folge der rascheren Abtrocknung an der unmittelbaren Holzoberfläche eine zum übrigen Brettquerschnitt andere Farbveränderung statt. Aufgrund der technischen Gegebenheiten kann Farbe aber lediglich oberflächlich gemessen werden. Dies zeigt sich in Abbildung 19 sehr deutlich im letzten Farbmesswert, welcher nach einem neuerlichen leichten Abhobeln der Oberfläche (siehe auch Abbildung 20) bestimmt wurde.

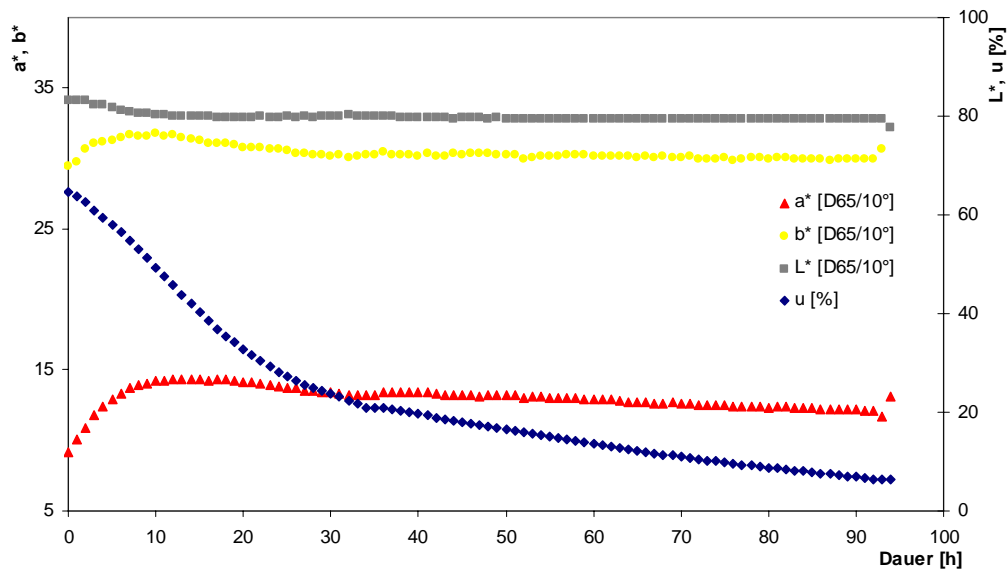


Abbildung 19: Farbwerte und Holzfeuchte einer Quasi-Online-Farbmessung von Erle

Versuche man das oberflächlich raschere Abtrocknen zu unterbinden indem man den Messkopf permanent an der Holzoberfläche aufliegen ließe, würde dies zu einer - zum Rest des Holzes sich unterscheidenden - Verfärbung führen. Ähnliche Verfärbungsreaktionen waren bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen von streifenförmigen Farbunterschieden unter den Stapellatten. VANEK (2001) führt ein sich unter den Stapellatten einstellendes Mikroklima als Ursache an. Ein permanent aufliegender Messkopf eines Onlinefarbmessgerätes würde ähnliches bewirken.

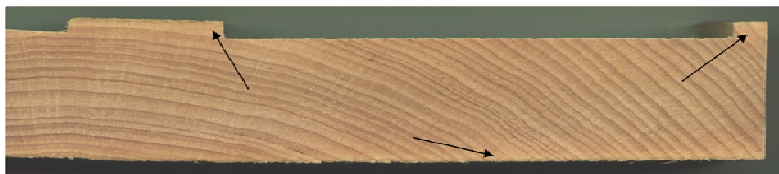


Abbildung 20: Nachgehobeltes Erlenbrett mit Randzoneneffekt

3.3.3 Trocknungsversuche

Eine kurze Dämpfbehandlung vor der Trocknung wirkte sich deutlich positiv auf die gleichmäßige rötliche Färbung des Holzes aus. Der Temperaturbereich für diese Behandlung liegt im Idealfall im Bereich zwischen 40 und 60 °C, bei einer Haltedauer von 30 bis 40 Stunden. Abbildung 21 verdeutlicht sehr eindrucksvoll den Einfluss von Temperatur und Dauer auf die Holzfarbe. Eine Temperaturbehandlung bei 50 °C für 32 h mit anschließender Trocknung nach dem Standardtrocknungsprogramm lieferte die gewünschte Hauptfarbe, verglichen mit den zu Beginn von Kapitel 3.3 beschriebenen Farbmustern.

Aufgrund der Erkenntnisse, dass Enzyme bei der Holzverfärbung eine bedeutende Rolle einnehmen, wurde in einer Trocknung versucht eine Enzyminaktivierung durch erhöhte Temperatur zu erreichen. Hierfür wurden die frischen Probenbretter vor der Trocknung in der

Versuchskammer für 5 h einer Temperatur von 95 °C ausgesetzt. Mittels Inaktivierung der Enzyme sollte erreicht werden, dass ungleichmäßige fleckige Verfärbungen des Holzes nicht mehr auftreten. Derartige Bedingungen lieferten eine sehr homogene und einheitliche Farbe, jedoch nimmt der Rotanteil markant ab. Dies zeigt sich sehr deutlich darin, dass die Proben dieses Versuchs nicht den üblichen typischen rötlichen Farbton von Erle, sondern eine einheitliche bräunliche Durchfärbung des Holzes aufweisen. Eine derartige Behandlung bedeutet für die industrielle Umsetzung zwar eine Zeitersparnis, jedoch ein gleichzeitiges Abdriften der Holzfarbe in einen Brauntönen. Zusätzlich müsste für diese Methode eine höhere Spitzenleistung der Heizkessel für die Wärmeeinbringung zur Verfügung stehen. Eine Anwendung in Standardtrockenkammern – also nicht kombinierte Dämpf-Trockenkammern – ist daher technisch schwierig.

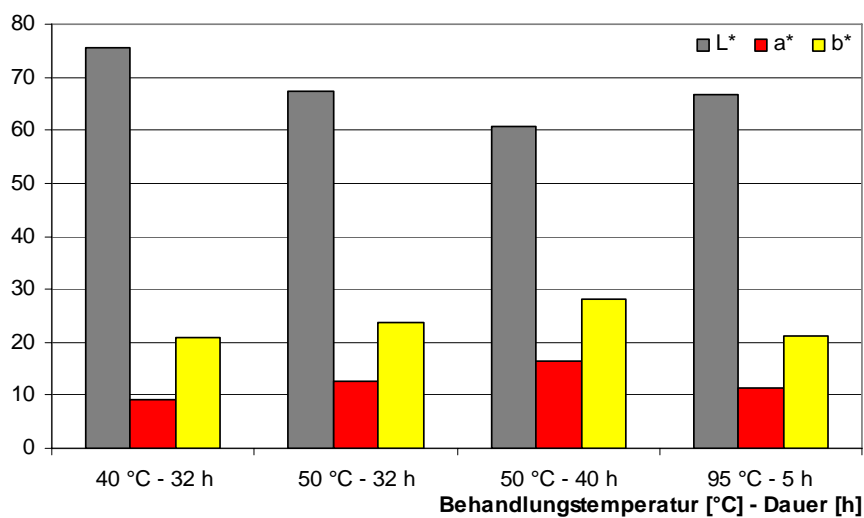


Abbildung 21: L*a*b*-Farbwerte für hygrothermisch behandeltes Erlenholz

3.3.3.1 Enzymbehandlung vor der Holz Trocknung

Ein Aufbringen einer gepufferten Enzymlösung (Laccase) bewirkte bei frischen Probenbrettern unter Verwendung einer Konzentration von 10 U/mol eine signifikant stärkere Farbänderung als bei unbehandelten. Ein enzymhemmendes Mittel kann diesen Effekt jedoch unterbinden. Die Verwendung eines Enzymhemmers bei nicht oberflächlich behandelten frischen Proben führte zu keiner optisch wahrnehmbaren Abschwächung des Verfärbungsverhaltens im Zuge der Trocknung. Statistische Auswertungen der gemessenen Farbwerte bestätigen dies auf einem Signifikanzniveau von 5 %.

Vergleichend wurden auch bereits technisch getrocknete Bretter mit Laccase (10 U/mol) besprüht. Durch das Aufbringen der Enzyme konnte das Verfärbungsverhalten von Erle in abgeschwächter Form wieder reaktiviert werden. Zwischen unbehandelten und behandelten trockenen Proben ergaben sich signifikante Unterschiede in den Farbwerten (Abbildung 22).

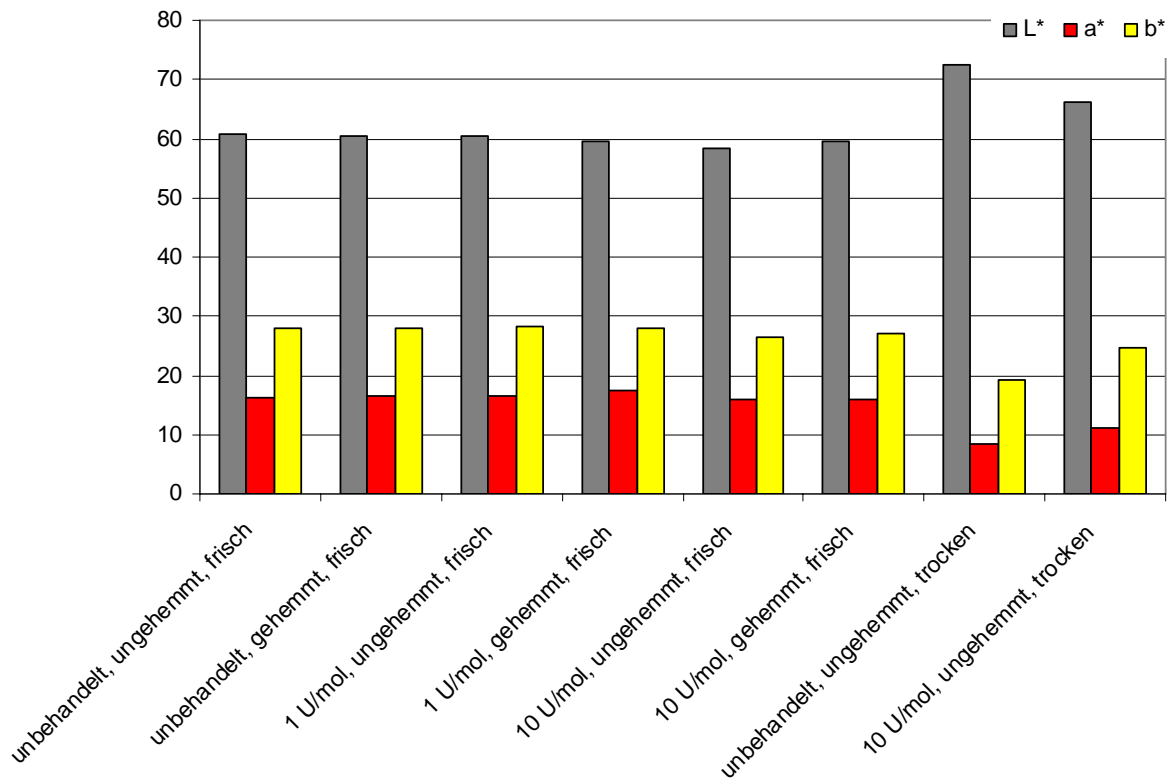


Abbildung 22: L*a*b*-Farbwerte für mit Enzymen (Laccase) behandeltes Erlenholz nach der Trocknung

3.3.3.2 Wasserlagerung

Um Verfärbungsreaktionen zu erzielen zeigten die Vorversuche, dass es für die hygrothermische Farbmodifikation von Erle erforderlich war Schnittholz mit einer Holzfeuchte deutlich über dem Fasersättigungspunkt (30 %) vorliegen zu haben. Ein Ansatz für eine längere Lagermöglichkeit des frischen Schnittholzes bis zur technischen Trocknung wäre jener der Wasserlagerung. Es wurden nun in einem Versuch 32 mm starke sägefrische Erlenbretter über einen Zeitraum von 3 Wochen in Wasser gelagert (Lagerung in einem Wasserbecken). Während dieses Zeitraums erfolgte ein zweimaliges Erneuern des Wassers. Die anschließende Trocknung der Bretter geschah nach dem in Abbildung 15 dargestellten Trocknungsschema.

Entgegen den Erwartungen führt eine Lagerung – um nicht zu sagen Tränkung – der Erlenversuchsbretter in einem mit Wasser gefüllten Behälter zu einer deutlichen Abnahme der Holzfeuchtigkeit unter 100 %. Die Feuchtigkeitswerte nach der Wasserlagerung (entspricht den Holzanfangsfeuchten für den Trocknungsversuch) lagen im Bereich von 50 bis 60 %. Lediglich die Brettrandzone wies eine Holzfeuchte deutlich über jenem der Brett kernzone auf. Es kam somit im Zuge der Feuchtigkeitsabnahme zu einer Umkehr des Holzfeuchteprofils über den Brettquerschnitt wie dies aus Abbildung 23 hervorgeht.

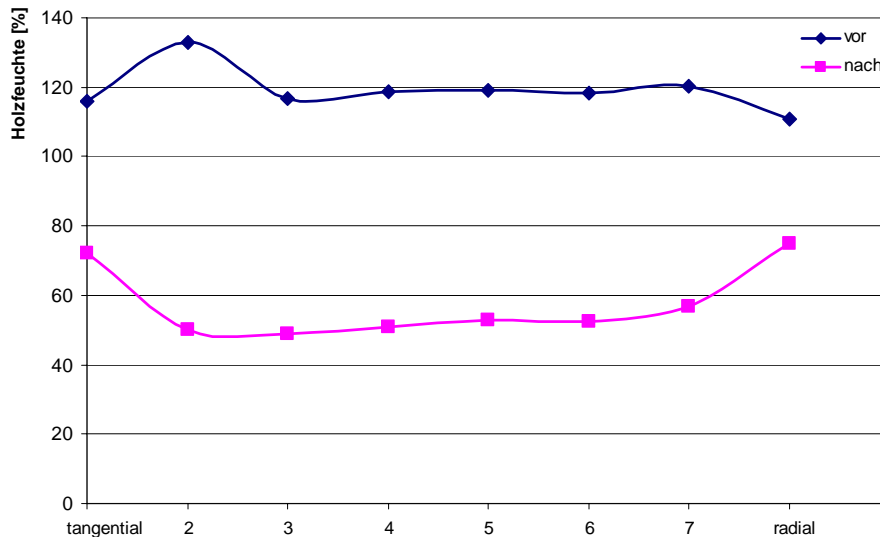


Abbildung 23: Holzfeuchteverteilung der Erlenbretter vor und nach der Wasserlagerung

Trotz des positiven und gewünschten Umstandes, dass die Holzfeuchte auch nach einer 3-wöchigen Lagerung noch deutlich über dem Fasersättigungspunkt (~30 %) lag, konnte durch die anschließende Trocknung nicht das gewünschte Farbergebnis erzielt werden. Wie in Abbildung 24 ersichtlich tritt nach der Trocknung der wassergelagerten Proben keine gleichmäßige Färbung der Erlenbretter auf. Ein ähnliches Farbbild tritt auch in der Praxis immer wieder als unerwünschte fleckige Erscheinung auf.

Ursache hierfür dürfte einerseits eine ungleichmäßige Feuchteverteilung über das gesamte Brett sein. Besonders die Randzonen weisen deutliche, dunkle Flecken auf. Dies kann auf eine höhere Feuchtigkeit dieser Bereiche zurückgeführt werden. Stirnseitig und somit in Faserrichtung ist ein Eindringen von Wasser und Bakterien aufgrund der Holz Anatomie bedeutend leichter möglich. Auch eine damit einhergehende ungleichmäßige Auswaschung und Herauslösung von Holzinhaltstoffen, die für die biochemischen Reaktionsmechanismen der Holzverfärbung von Bedeutung sind, kann als Ursache für die fleckige Verfärbung angeführt werden. In der Industrie kann eine längere Lagerung des Erlenrundholzes oder des Schnittholzes bei feuchtem Klima zu einer unregelmäßigen Abtrocknung führen. Ein humides Klima begünstigt in den meisten Fällen auch einen rascheren Befall des Holzes mit Pilzen und Bakterien.



Abbildung 24: Soll-Farbe nach der technischen Erlenschnittholztrocknung (oben) und fleckige Verfärbung der wassergelagerten Bretter (unten)

3.3.4 UV-Stabilität

Da es sich bei Farbstoffen meist um spektralempfindliche chemische Verbindungen handelt, die sich bei Einstrahlung in bestimmten Wellenbereichen chemisch verändern, ist die Stabilität besonders bei UV-Disposition wichtig. UV-Stabilität sowie damit verbundene Farbmessungen wurden, um langzeit-farbstabilisierende Wirkung bzw. auftretende Farbänderungen aufzuzeigen, durchgeführt. Die Wirkung einer starken UV-Strahlung auf Erlenholz mit fortschreitender Einwirkzeit wird in Abbildung 25 jedem Betrachter sofort auffallen. Die zugehörigen L*a*b*-Farbwerte können Abbildung 26 entnommen werden. Aus den Kurven geht hervor, dass unbehandeltes Erlenholz (28/x), welches kaum einer Farbänderung im Zuge der Trocknung unterlag, zu einer deutlich stärkeren Vergilbung und damit einhergehend Abdunkelung durch das UV-Licht neigt.



Abbildung 25: Farbvergleich nach UV-Bestrahlung (0 bis 24 h) vier unterschiedlicher Erlenbehandlungen

Auch für Erle gilt analog zu den Langzeitstabilitätsversuchen von Buche, dass der Vergilbungsprozess mit zunehmender Einwirkungszeit immer langsamer vor sich geht und die Holzfarbe sich immer stärker einem Endfarbwert annähert.

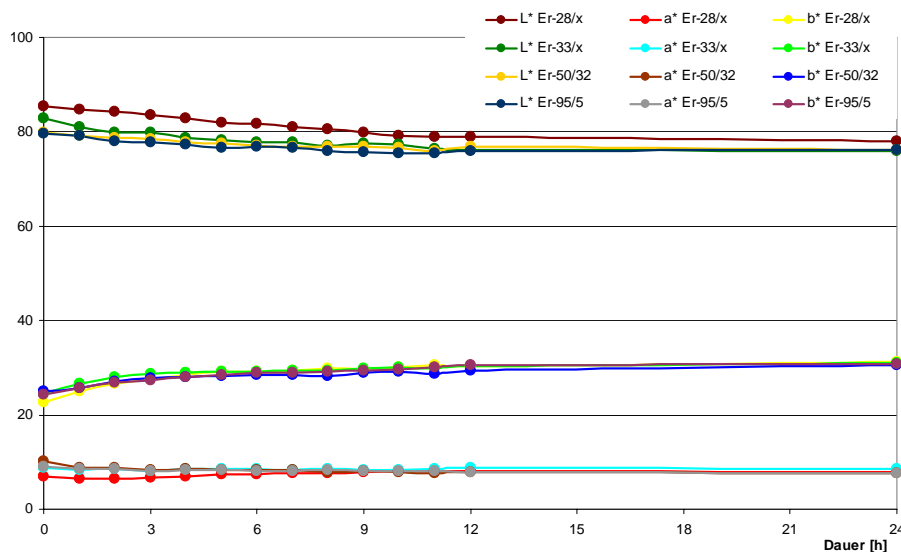


Abbildung 26: Änderungen der Erlenholzfarbe durch UV-Bestrahlung

3.3.5 Shigometrische Untersuchungen

Shigometrie ist ursprünglich ein Messverfahren der Forstpathologie, mit dessen Hilfe die Gesundheit von Bäumen und der Zustand ihres Holzes, ob unbeeinträchtigt oder durch Pilze angegriffen, ermittelt werden kann. Hierzu werden die Muster des elektrischen Widerstandes gemessen werden. Dazu wird vom Shigometer pulsierender Gleichstrom erzeugt. Gemessen wird der augenblickliche Zustand des Holzes, welcher sich in dessen Feuchtegehalt und in der Konzentration der Ionen äußert.

Untersucht wurden Flecken von verfärbtem Erlenschnittholz sowie Unterschiede zwischen den Behandlungsstufen mittels Extract Electrical Resistance (EER) Verfahren. Zusätzliche Analysen des radialen Verlaufs der EER-Werte in Kiloohm [kΩ] ergänzen die Versuche. Für die Messungen mit dem Shigometer wurden 0,100 bis 0,105 g Bohrmehl der zu analysierenden Messbereiche in 4 ml destilliertem Wasser für eine Stunde gelöst. Anschließend erfolgte die Messung der Lösungen mit einer Doppelnadelelektrode (1,7 cm Nadelabstand), die ca. 1-2 cm tief in die Lösung eingetaucht wurde.

Als Standards wurden reines destilliertes Wasser und zwei Kalium-Chlorid-Lösungen mit 0,5 bzw. 1,0 mM verwendet.

Grundsätzlich gilt, dass äußeres Splintholz als Referenzpunkt für die Skalierung und Beurteilung dient. Kernholz und nicht befallenes Holz weisen einen geringen Wert an Kationen auf und somit einen hohen elektrischen Widerstand. Mit Pilzen oder Bakterien infiziertes Holz aber auch

verfärbte Zonen verfügen über einen höheren Anteil an Ionen und weisen damit einhergehend einen geringen elektrischen Widerstand auf.

Messungen des elektrischen Widerstandes mit dem Shigometer erfolgten grundsätzlich bei Raumtemperatur unter immer den selben Bedingungen, da selbst die Dauer der Wartezeit zwischen dem Ansetzen der Lösung und dem Messen bereits einen deutlich Einfluss hat.

3.3.5.1 Zusammenhang zwischen Farbe und Ionenkonzentration

Erlenholzproben mit unterschiedlichen Farbzonen der streifigen und fleckigen Verfärbung, wie diese z.B. nach der Wasserlagerung auftrat, wurden untersucht. Sowohl die Werte des elektrischen Widerstandes für die gemessenen Zonen, als auch eine Klassifizierung der Farbe können der nachfolgenden Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Elektrischer Widerstand [kΩ] in den definierten Farbzonen mit der zugehörigen Farbklassifizierung

Probe	Zone	[kΩ]		Klassifizierung der Farbe
		1 h	3 h	
1	A	30,7	25,5	—
	B	25,2	23,5	gräulich
	C	26,4	25,0	—
	D	18,8	17,6	rötlich
	E	22,7	20,3	— (Splintbereich)
2	F	19,0	17,8	rötlich
	G	29,0	26,1	—
	H	33,7	32,9	bräunlich
3	I	10,0	8,3	Braunfäule -innerhalb der Grenzlinie
	J	13,8	11,6	Braunfäule -außerhalb der Grenzlinie
	K	41,5	38,5	dunkler
	L	35,3	31,3	—
4	M	31,5	30,3	leicht rötlich
	N	21,0	20,5	—

Der elektrische Widerstand des Splintholzes der Probe 1 (E) weist einen niedrigeren Wert auf als die subjektiv nicht verfärbten Zonen im Kernholz (C und A). Der elektrische Widerstand von

gesundem Splintholz wird als Vergleichswert zum Kernholz herangezogen. Das Kernholz mit höherem elektrischen Widerstand als das Splintholz ist stabil und gesund. Falls aber der Wert des elektrischen Widerstands des Kernholzes unter dem des gesunden Splintholzes liegt, deutet das auf einen Pilzbefall hin.

Die rötlich verfärbten Bereiche in Probe 1 (Zone D) und Probe 2 (Zone F) zeigen einen niedrigeren elektrischen Widerstand als das Splintholz und somit eine höhere Ionenkonzentration gegenüber diesem. Daraus kann auf einen anfänglichen Pilzbefall geschlossen werden, der die rötliche Verfärbung hervorruft. Die bräunliche (Probe 2, H) sowie die gräuliche Verfärbung (Probe 1, B) scheint eine andere Ursache zu besitzen als einen akuten Pilzbefall. Die Werte dieser Verfärbungen liegen über dem Wert des Splintholzbereichs. Auffallend sind die niedrigen Werte der Probe 3 der Zonen I und J. sie bestätigen die erkennbare Braunfäule um einen eingewachsenen Ast.

Nach den shigometrischen Untersuchungen haben die unterschiedlich gefärbten Streifen (rötlich, bräunlich) verschiedene Ursachen. Die rötliche Verfärbung lässt auf einen anfänglichen Pilzbefall schließen. Die Werte der bräunlichen und gräulichen Verfärbung liegen im Bereich von gesundem Erlenholz und sind somit nicht von einem Pilz verursacht.

Die Einzelwerte der nicht verfärbten Zonen der Probe 1 (A, C und E) weisen auf einen Alterstrend ausgehend von einem höheren elektrischen Widerstand im Kernholz, abfallend zu einem niedrigeren im Splintholz hin.

Die Dauer, die die Bohrproben in deionisiertem Wasser ruhen gelassen wurden, hat einen Einfluss auf den gemessenen elektrischen Widerstand (siehe Tabelle 4). Die Werte sind durchschnittlich um ca. 2,1 k Ω geringer, schwanken aber von 0,5 bis 5,2 k Ω .

Die Daten der Untersuchungen zum Alterstrend von zwei Erlenproben (Probe 5 und 6) über den gesamten Querschnitt können Abbildung 27 entnommen werden.

Entlang der Jahrringe zeichnen sich in den zwei ausgewählten Proben sehr unterschiedliche Trends ab. Die Probe 5 zeigt einen erwarteten Trend von nicht infiziertem Holz. Die Werte des elektrischen Widerstands im Kernholz liegen über denen im Splintholz und es ist ein klarer absteigender Alterstrend von innen nach außen erkennbar. In der Probe 6 gibt es bezogen auf die Ionenkonzentration keinen typischen Alterstrend. Die Werte des elektrischen Widerstands im Splintholz liegen im Durchschnitt über dem des Kernholzes. Bis zum Jahrring Nr. 9 ist noch ein typischer Verlauf erkennbar, danach schwanken die Werte sehr stark und liegen im Durchschnitt über 40 k Ω . Das lässt auf eine sehr geringe Ionenkonzentration schließen. Im 33. Jahrring fällt der elektrische Widerstand auf den Wert einer bräunlichen Verfärbung (nach Tabelle 4) zurück. diese findet sich im Querschnitt als leicht sichtbare Verfärbung wieder.

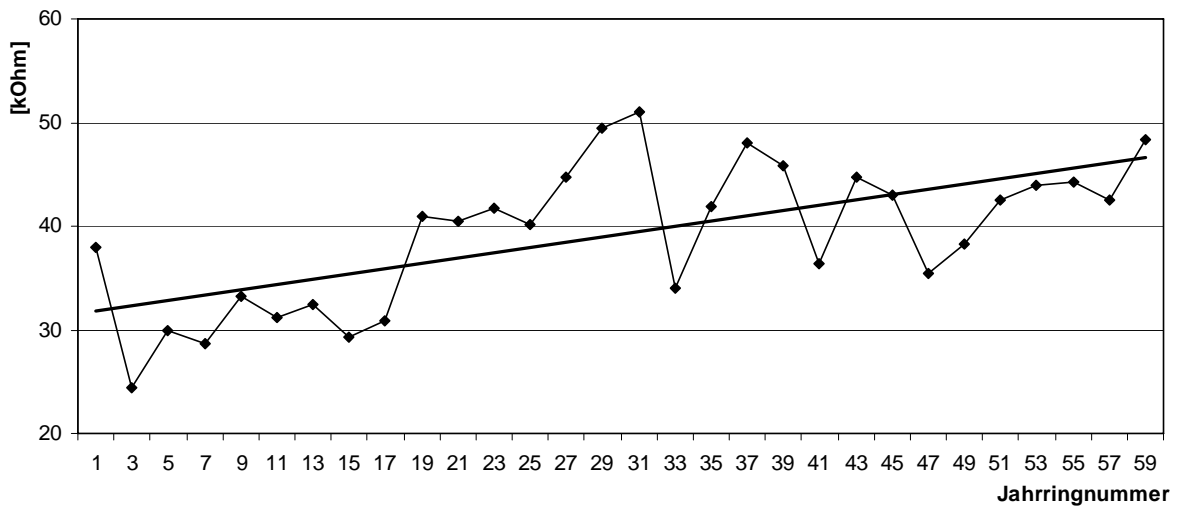
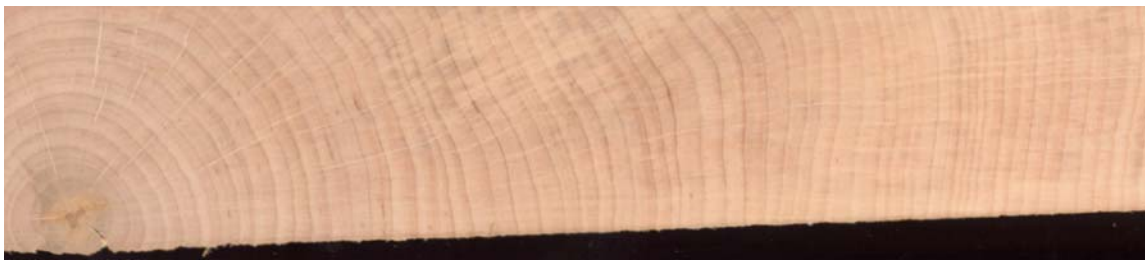
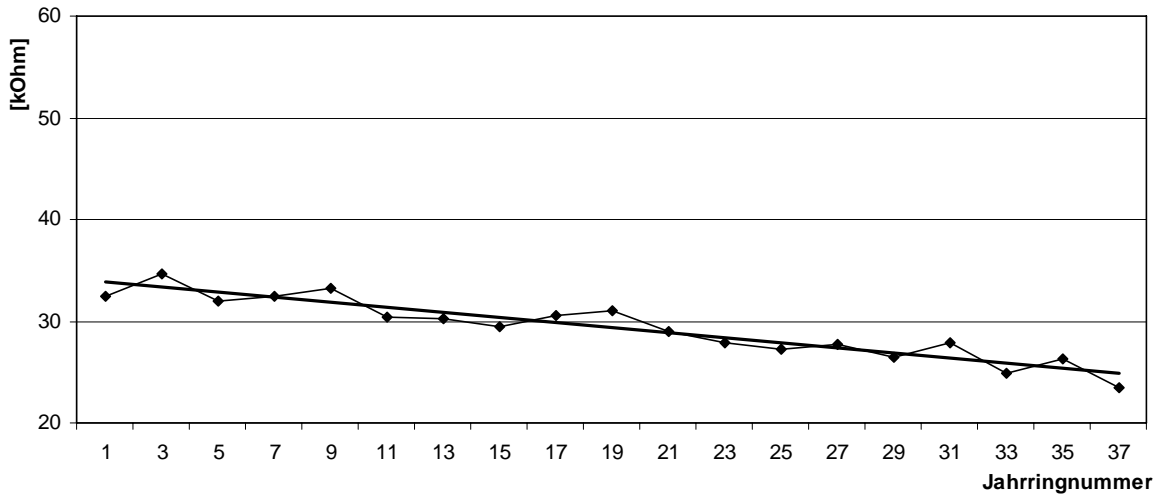


Abbildung 27: Alterstrend des elektrischen Widerstands über den Querschnitt von Erle (oben: Probe 5, unten: Probe 6)

Nach den shigometrischen Untersuchungen an Erlenholz mittels EER-Methode (extract electrical resistance) lassen sich folgende Beziehungen über den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Zustand des Holzes aufstellen:

Tabelle 5: Elektrische Widerstandswerte von Erlenholz unterschiedlicher Zustände

Zustand des Gewebes	EER [k Ω]
nicht infiziertes Splintholz	22-24
nicht infiziertes Kernholz	> 25,2
verfärbtes Kernholz	18,2
infiziertes Kernholz	10,1

In Splintholz sollte der elektrische Widerstand über 22 bis 24 k Ω liegen, in Kernholz über 25,2 k Ω . Ist dies der Fall, kann das Holz als gesund und nicht von einem Pilz befallen erachtet werden. Befinden sich die Werte in einem Bereich um 18 k Ω , sind Verfärbungen sichtbar, die durch einen Pilzbefall verursacht wurden. Ist der elektrische Widerstand sehr gering und liegt in einem Bereich um 10 k Ω , dann ist der Befall als eindeutige Fäule sichtbar.

Zu beachten ist, dass die Einteilung des Erlenholzes nach seinem Zustand auf einem kleinen Probenumfang beruht. Die Abgrenzung der Messbereiche zwischen infiziertem und nicht infiziertem Erlenholz ist unscharf. Um eine klare Aussage über den Pilzbefall bei Erlenholz mit Hilfe der Shigometrie treffen zu können, ist eine genauere Einteilung der Messbereiche zwischen infiziertem und nicht infiziertem Holz anhand eines größeren Probenumfangs notwendig.

4 Färbung von Erlen- und Buchenklötzchen mit Laccase

Für die Färbung der Probenklötzchen aus Erlen- und Buchenschnittholz wurden zwei Versuche durchgeführt:

4.1 Imprägnierung

Für die Imprägnierung wurden jeweils vier frische und trockene Buchen- und Erlenklötzchen (~4x4x3 cm³) in eine gepufferte Laccaselösung [1 U/ml Laccase; Succinatpuffer 10 mM, pH5) eingelegt und sechs Stunden im Wasserstrahlvakuum evakuiert. Jeweils zwei der vier Würfel wurden aus der Lösung entfernt und bei 50 bzw. 100 °C getrocknet. Die übrigen Würfel verblieben über Nacht in der Imprägnierlösung und wurden am folgenden Tag weitere sechs Stunden evakuiert. Danach wurden sie wie zuvor beschrieben getrocknet. Unbehandelte Referenzen wurden für 24 Stunden bei 50 bzw. 100 °C getrocknet.

Bei den Buchenproben zeigte sich eine allgemeine im Vergleich zu den Erlenproben gleichmäßigere Färbung. Weiters führte gleiche Behandlung bei trockener Buche zu dunkleren Farbtönen. Ein Einfluss der Trocknungstemperatur konnte nicht festgestellt werden. Bei Erle hingegen erhielt man mit feuchten Proben vor allem bei 100 °C Trocknungstemperatur sehr dunkle Würfel. Zu beachten ist, dass auch die feuchten Erlen-Referenzen so wie die behandelten Erlenproben sehr fleckig erscheinen.

4.2 Einfluss der Laccasekonzentration und der Einwirkdauer auf die Holzfärbung

Für diesen Versuch wurde eine Fläche jedes Holzwürfels in vier Zonen geteilt. Nacheinander wurde in jede Zone ein 20 µl Tropfen einer Laccaselösung (1 bzw. 10 U/ml) aufgegeben und in luftfeuchter Umgebung bei Raumtemperatur stehen gelassen. In Zone A wurde zum Zeitpunkt 0, in Zone B nach einer Stunde, in Zone C nach weiteren 30 Minuten und in Zone D anschließend nach 10 Minuten getropft. Somit ergeben sich folgende Einwirkzeiten:

A...2h

B...1h

C...30min

D...10min

Mit der niedriger konzentrierten Laccaselösung (1 U/ml) konnte keine Verfärbung der Proben beobachtet werden. Einzig die feuchte Erle zeigte wie im vorigen Versuch Flecken, die aber nicht eindeutig der Enzymlösung zugeordnet werden können. Mit der höher konzentrierten Lösung

wurde feuchte Buche leicht verfärbt. Auf trockener Buche konnte keine Einwirkung nachgewiesen werden. Sowohl bei trockener wie auch bei feuchter Erle war der Effekt eindeutig, dürfte aber nicht von der Wirkdauer abhängen.

Zur Ermittlung der Abhängigkeit von der Wirkdauer dürfte dieser Versuch nicht geeignet sein, da sich bei Versuch 1, mit längeren Einwirkzeiten sehr wohl ein deutlicher Einfluss gezeigt hat.

Tabelle 6: Enzymbehandlungen für Erle und Buche

Probennummer	Holzart	feucht-trocken	Laccase Konz. [U/ml]	Imprägnier-Zeit [h]	Trocken-temperatur
1	Erle	trocken	1	6	50
2	Erle	trocken	1	6	100
3	Erle	trocken	1	28	50
4	Erle	trocken	1	28	100
5	Buche	trocken	1	6	50
6	Buche	trocken	1	6	100
7	Buche	trocken	1	28	50
8	Buche	trocken	1	28	100
9	Buche	feucht	1	6	50
10	Buche	feucht	1	6	100
11	Buche	feucht	1	28	50
12	Buche	feucht	1	28	100
13	Erle	feucht	1	6	50
14	Erle	feucht	1	6	100
15	Erle	feucht	1	28	50
16	Erle	feucht	1	28	100
17	Erle	trocken	1 (20µl)	ABCD	50
18	Buche	trocken	1 (20µl)	ABCD	50
19	Erle	feucht	1 (20µl)	ABCD	50
20	Buche	feucht	1 (20µl)	ABCD	50
21	Erle	trocken	10 (20µl)	ABCD	50
22	Buche	trocken	10 (20µl)	ABCD	50
23	Erle	feucht	10 (20µl)	ABCD	50
24	Buche	feucht	10 (20µl)	ABCD	50
25	Buche	trocken	x	x	50 (24h)
26	Buche	trocken	x	x	100 (24h)
27	Erle	trocken	x	x	50 (24h)
28	Erle	trocken	x	x	100 (24h)
29	Buche	feucht	x	x	50 (24h)
30	Buche	feucht	x	x	100 (24h)
31	Erle	feucht	x	x	50 (24h)
32	Erle	feucht	x	x	100 (24h)
	Einwirkzeit:	A = 2h	B = 1h	C = 30 min	D = 10 min



Abbildung 28: Ergebnisse der Buchen-Imprägnierung



Abbildung 29: Ergebnisse der Erlen-Imprägnierung



Abbildung 30: Ergebnisse des „Tropfenversuchs“

5 Holzextraktstoffbestimmungen

5.1 Material und Methoden

Die vorzerkleinerten Holzstücke wurden mit der Retsch Ultrazentrifugalmühle zu einem feinen Mehl mit maximal 80 µm Korngröße vermahlen, der Feuchtigkeitsgehalt bestimmt. Dazu wurden 0,5 g Holzmehl in vortarierte Glasschalen eingewogen und im Darrofen bis zur Gewichtskonstanz bei 103±2 °C getrocknet. Die gemahlene Proben wurden in Photodosen bei Raumtemperatur aufbewahrt.

Alle Extraktionen wurden mit dem Büchi B-811 Extraktor durchgeführt. Vier Gramm Holzmehl wurden in eine Glasfaserextraktionshülse eingewogen. Zuerst wurde 5 Stunden mit 150 ml einer Mischung aus Cyclohexan und Ethanol (2:1) und in der Folge mit 150 ml Ethanol zur Entfernung des Cyclohexans extrahiert. Eichenspäne wurden weitere drei Stunden mit 150 ml Ethanol extrahiert. Die Extrakte wurden in tarierten 250 ml Rundkolben vereinigt (Extrakt A), das Lösungsmittel abrotiert und der Extrakt bei 105 °C getrocknet. Das Holzmehl wurde in der Folge für 6 Stunden mit 150 ml einer Mischung aus destilliertem Wasser und Ethanol (1:1) (Extrakt B) und danach für 24 Stunden mit 150 ml destilliertem Wasser (Extrakt C) extrahiert. Die Extrakte wurde getrennt in tarierte 250 ml Rundkolben überführt, der Ethanol abrotiert und das Wasser im Trockenschrank entfernt. Alle Extraktionen wurden doppelt ausgeführt.

5.2 Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen

Für die chemische Charakterisierung der Holzproben wurden quantitative Untersuchungen durchgeführt. Die chemischen Analysen von wärmetechnisch behandeltem Erlenholz zeigen, dass mit zunehmender Verfärbung durch die Holz Trocknung in Richtung dunkler kein signifikanter Unterschied in der Größe des Extraktstoffgehalts festgestellt werden kann. Ursache für das deutliche Hervortreten von Muster 3 in Bezug auf den Gehalt an Extraktstoffen kann mit einer nicht verfärbungsbedingten Ursache erklärt werden. Das Rohmaterial von Muster 3 wies deutliche biotische Schäden auf (Tabelle 7).

Tabelle 7: Quantitativer Vergleich der Extraktgehalte [%] der Erlenfarbmuster (siehe Abbildung 16)

	Cyclohexan/ Ethanol (A)	SD	Ethanol/ Wasser (B)	SD	Wasser (C)	SD	Summe Extrakte	SD
Muster 1	3,85	0,09	1,47	0,25	3,08	0,23	8,39	0,38
Muster 2	3,85	0,17	1,54	0,19	2,70	0,52	8,08	0,58
Muster 3	5,33	0,16	1,88	0,32	3,12	0,32	10,32	0,45
Muster 4	4,37	0,12	1,47	0,11	2,48	0,36	8,32	0,35
Muster 5	3,58	0,01	1,24	0,30	3,00	0,27	7,82	0,01
Muster 6	4,22	0,01	1,61	0,16	3,40	0,31	9,22	0,16
Muster 7	4,16	0,03	1,21	0,17	2,80	0,17	8,17	0,36

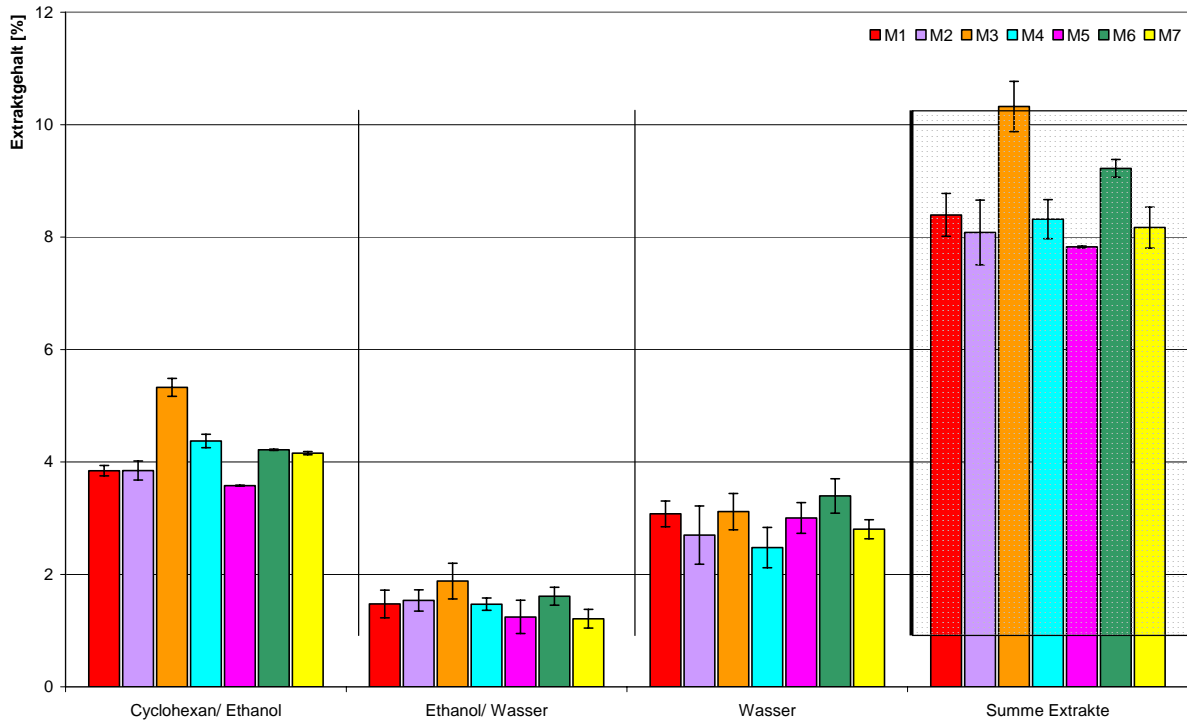


Abbildung 31: Extraktgehalte [%] der Erlenfarbmuster (grafische Darstellung)

Quantitative chemische Analysen wurden vergleichend auch an Erle, Eiche und Buche durchgeführt. Für die Unterscheidung kamen jeweils Proben mit heller, als auch mit dunkler Farbgebung im Zuge einer wärmetechnischen Behandlung zum Einsatz.

Die chemischen Analysen zeigen, dass Erle und Eiche in hellem Zustand bezogen auf atro Holz in Summe einen um ca. 0,70 % höheren Anteil an Extraktstoffen aufweisen. Bei Buche liegt eine Zunahme des Gehaltes für die dunkleren Proben vor.

Tabelle 8: Quantitativer Vergleich der Extraktgehalte [%] verfarbter Holzmuster

	Cyclohexan/ Ethanol (A)	SD	Ethanol/ Wasser (B)	SD	Wasser (C)	SD	Summe Extrakte	SD
Er hell	3,55	0,03	1,32	0,04	2,93	0,15	7,79	0,16
Er dunkel	3,00	0,03	1,37	0,03	2,81	0,51	7,18	0,50
Ei hell	7,64	0,01	7,25	0,28	3,65	0,17	18,54	0,11
Ei dunkel	6,54	0,22	6,43	0,18	4,17	0,61	17,14	0,66
Bu hell	2,68	0,05	2,10	0,00	3,62	0,15	8,40	0,20
Bu dunkel	3,58	0,01	2,19	0,14	3,35	0,47	9,12	0,60

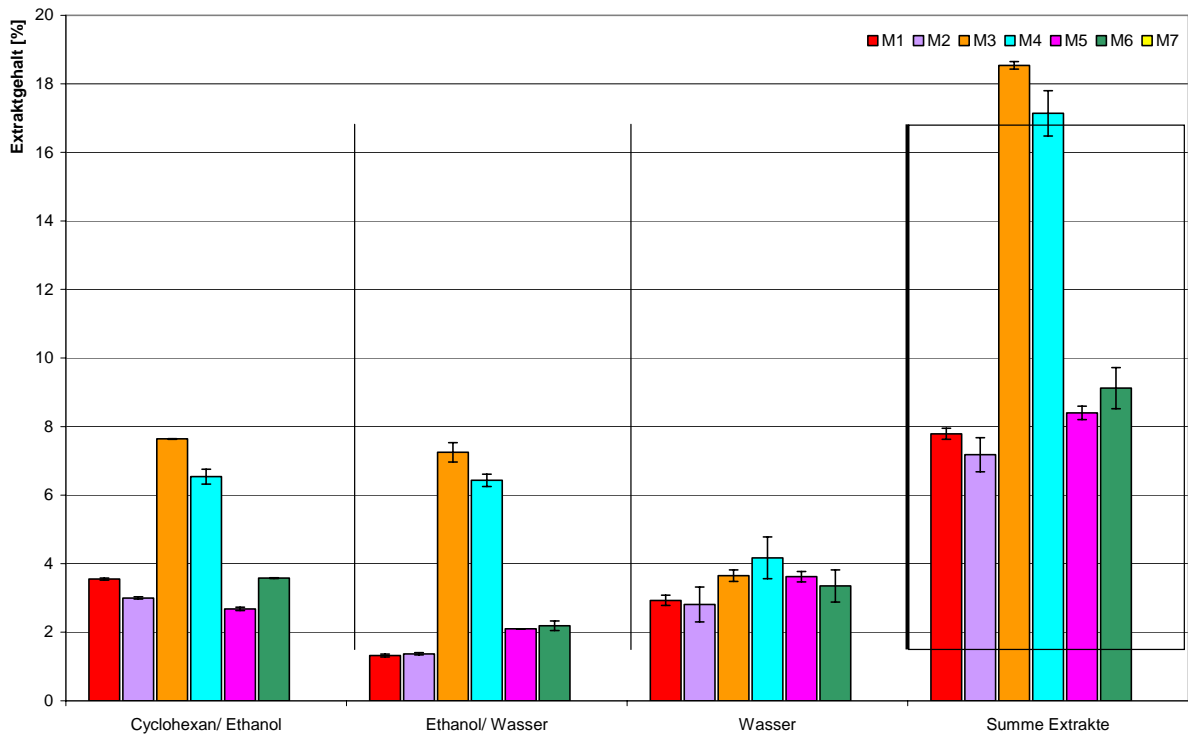


Abbildung 32: Extraktgehalte [%] verfärbter Holzmuster (grafische Darstellung)

6 Eiche (*Quercus* sp.)

6.1 Material und Methoden

Die Konvektionstrocknungen wurden in der Versuchstrockenkammer der Universität für Bodenkultur am Institut für Holzforschung durchgeführt. Das Grundprinzip entspricht, nach diversen Umbauten im Zuge des Projekts, dem einer kombinierten Dämpf-Trockenkammer.

Die Trocknungsschemata wurden in Anlehnung an Vorgaben aus der Praxis für Eiche dieser Dimension (32 mm Stärke) gestaltet, wobei das Hauptaugenmerk auf einem neuen Ansatz mittels Kombiprozesstechnik gelegt wurde.

In Abbildung 33 bis Abbildung 35 werden die Trocknungsschemata der eigentlichen Trocknungsphase dargestellt. Zu berücksichtigen ist, dass zu Beginn der Trocknung eine Aufheiz- und Durchwärmphase, sowie am Ende eine Konditionier- (bei allen drei Trocknungen gleich mit 60 °C und einer Holzgleichsfeuchte von 7,2 %) und Abkühlphase durchlaufen werden. Für die Bestimmung der Holzfarbe mit dem Farbmessgerät (Chroma-Meter CR-410) wurde eine Holzendfeuchte von 8-10 % angestrebt.

Um Verfärbungen im Zuge der Trocknung zu vermeiden und um Trockenkapazitäten zu sparen wird Eiche aufgrund der langen Trockenzeiten üblicherweise am Freiluftlager vorgetrocknet. Die durchgeführten Versuchstrocknungen zielen auf die Verwendung von frischem Eichenschnittholz ab. Durch Trocknung Nr. 200 soll eine leichte gleichmäßige Tönung des Eichenschnittholzes erreicht werden. Die bereits zu Beginn eingestellte Temperatur von 45 °C ist hauptverantwortlich für die stärkere Färbung des Holzes.

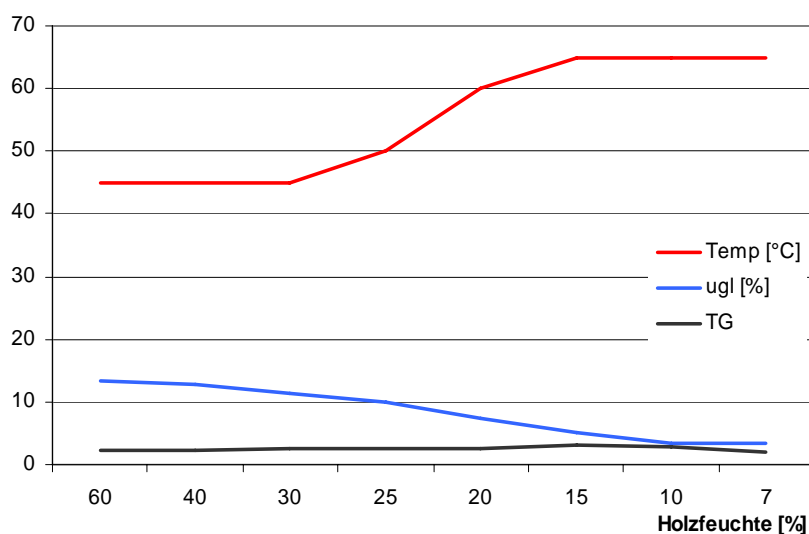


Abbildung 33: Trocknungsschema Nr. 200 für Eiche

Trocknungsschema Nr. 201 folgt nicht dem üblichen niedrigen Temperaturverlauf zur Erzielung eines hellen Farbtons bei der Trocknung von Eiche, sondern beginnt bereits vorzeitig mit dem Temperaturanstieg. Auf diese Weise wird einerseits anfänglich eine sichere Niedertemperaturphase durchlaufen, jedoch in der weiteren Folge ein die Farbunterschiede provozierender Verlauf eingeschlagen. Dieses ausloten der Grenzen soll die Wirksamkeit der Wärmeverbehandlung zu Beginn der Trocknung besser sichtbar machen. Die Temperatur und Dauer der Behandlungsstufe in der Anfangsphase wurden entsprechend Tabelle 9 eingestellt. Die Durchführung erfolgte außerhalb der Kammer in einem Klimaschrank. Zusätzlich zu den mit nicht gefrorenem Schnittholz durchgeführten Behandlungen wurden die Versuche Nr. 4-6 auch noch mit gefrorenem Holz gefahren. Die Temperatureinwirkung erfolgte bei den bei -12 °C tiefgekühlten Proben ohne vorherige schonende Auftauphase mit einem langsamen sukzessiven Anheben der Kammer- und somit der Holzkerntemperatur.

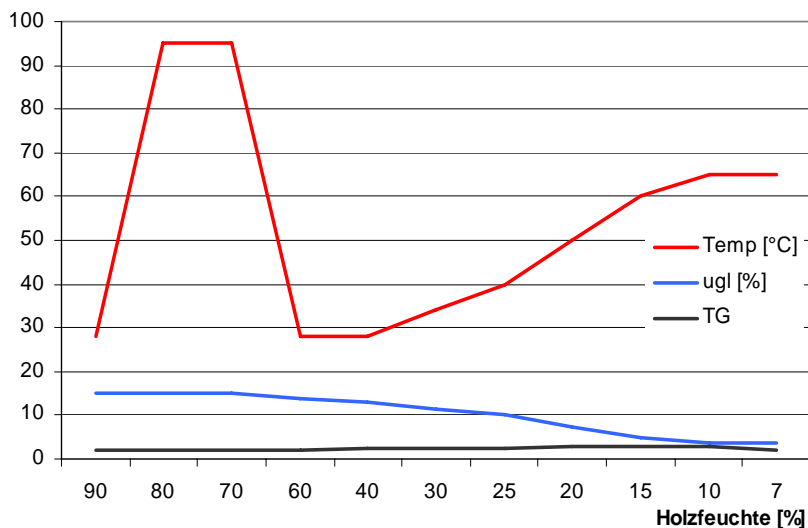


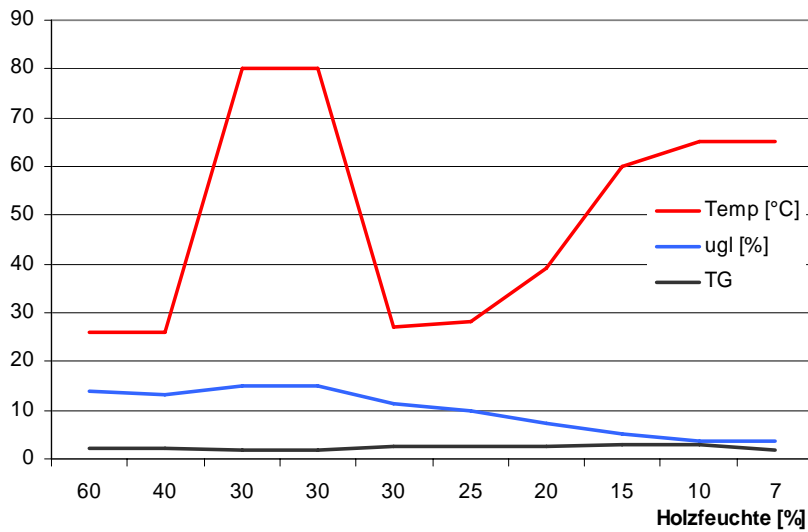
Abbildung 34: Trocknungsschema Nr. 201 für Eiche

Tabelle 9: Behandlungsstufen für die Eichenversuchstrocknung Nr. 201

Behandlungsnr.	Temp [°C]	Dauer [h]	ugl [%]
1	90	1	15
2	90	3	15
3	90	5	15
4	95	1	15
5	95	3	15
6	95	5	15
7	100	1	15
8	100	3	15
9	100	5	15

Das nachfolgende Trocknungsprogramm Nr. 202 unterscheidet sich vom vorhergegangenen prinzipiell dadurch, dass einerseits die Trocknungstemperatur bis zum Erreichen von 30 %

Holzfeuchte statt 28 °C nur 26 °C beträgt und andererseits die „Dämpfung“ für einen dunkleren Farbton für 24 h bei 30 % Holzfeuchtigkeit durchgeführt wird.



Abbildungung 35: Trocknungsschema Nr. 202 für Eiche

Die Ausgangsfeuchte und auch die Endfeuchte der Trocknungschargen wurden mittels Darrproben bestimmt und betrug im Mittel für alle Proben im frischen Zustand ca. 70 %. Die der Konvektionstrocknung zugeführten Bretter wurden vor Beginn der Trocknungen an ihren Stirnseiten mit Kunststoffklebeband versiegelt, das mit handelsüblichem wasserfestem Weißleim aufgeklebt wurde. Dieses Vorgehen diente wie auch für die Versuche mit Erlen- und Buchenholz der Simulation einer industriellen Trocknung hinsichtlich Verhältnis von Brettquerschnitt und -länge, da dadurch übermäßiges Austrocknen über die Endflächen vermieden werden kann. Im industriellen Maßstab ist dies nur ein Effekt der Enden, im Labor würde er sich allerdings praktisch auf die ganze Probenlänge ausdehnen, wodurch es zu einer schlechten Simulation einer industriellen Kammertrocknung kommen würde.

6.2 Ergebnisse

In Tabelle 10 bis Tabelle 12 und Abbildung 36 sind die Ergebnisse der Farbmessung der einzelnen Trocknungen dargestellt. Jeder, der in den Abbildungen dargestellte Farbwert entspricht bereits dem Gesamtmittelwert der einzelnen Trocknungsversuche mit bzw. ohne Vorbehandlung, wobei je Probe 6 Einzelmessungen vorgenommen wurden. In den Tabellen sind die Mittelwerte, Standardabweichungen, Maxima und Minima aller Messungen der jeweiligen Trocknung zusammengefasst. Bei allen Trocknungen ist die ausgesprochene Homogenität der Farbwerte auffallend, die sich auch in den relativ niedrigen Standardabweichungen widerspiegelt. Die höchste Helligkeit (L^*) wurde für die Referenzmuster, welche von Proben, die bei Normklima getrocknet und gelagert wurden, mit einem durchschnittlichen Wert von $L^*=68,27$ erreicht. Gleichzeitig wurden bei diesen auch die geringsten a^* - und b^* -Werte mit jeweils 6,39 und 17,86 festgestellt. Alle technischen Trocknungen der Eichenversuche weisen dunklere Farben auf, auch wenn Trocknungsprogramm Nr. 201 für das Einstellen einer hellen Eichenholzfarbe erstellt wurde. Farbwerte der Trocknung Nr. 201 stammen von Messungen an Proben, die nicht einer Hitzevorbehandlung unterzogen wurden.

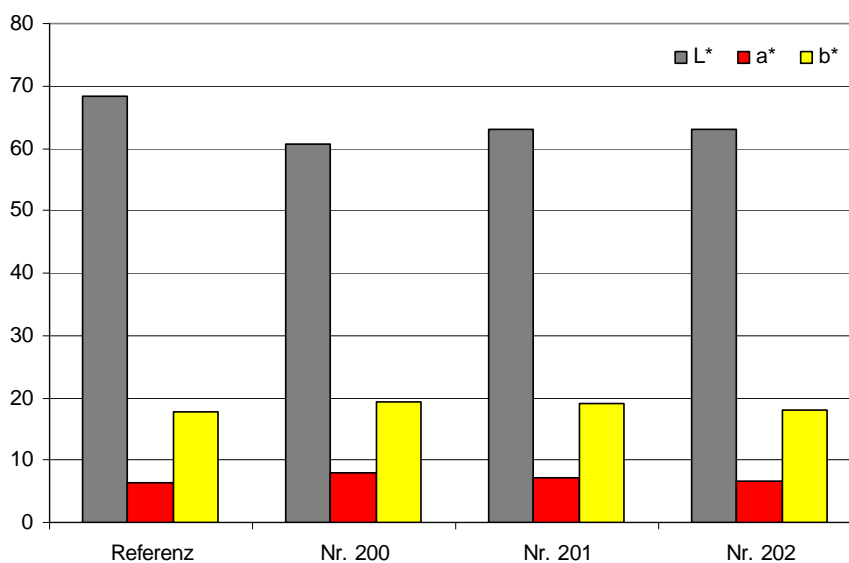


Abbildung 36: $L^*a^*b^*$ -Farbwerte für Eiche-Referenz und einzelne Trocknungschargen

Tabelle 10: $L^*a^*b^*$ -Farbwerte der Trocknung Nr. 200

	L^*	a^*	b^*
Mittelwert	60,54	7,84	19,40
Standardabweichung	2,02	0,32	0,53
Maximum	66,42	8,65	20,41
Minimum	55,03	7,17	17,74

Tabelle 11: L*a*b*-Farbwerte der Trocknung Nr. 201 (ohne Hitzevorbehandlung)

	L*	a*	b*
Mittelwert	62,93	7,14	18,98
Standardabweichung	1,13	0,31	0,38
Maximum	65,09	7,88	19,51
Minimum	60,52	6,68	18,13

Tabelle 12: L*a*b*-Farbwerte der Trocknung Nr. 202

	L*	a*	b*
Mittelwert	63,09	6,53	18,02
Standardabweichung	1,47	0,26	0,37
Maximum	66,62	7,59	18,64
Minimum	59,57	6,10	17,03

Wie in Abbildung 37 ersichtlich und auch statistisch untersucht, bewirkt eine Vorbehandlung bei erhöhter Temperatur keine signifikante ($\alpha=0,05$) Änderung verglichen mit unbehandelten Proben (28-x) für das Trocknungsprogramm Nr. 202. Deutliche weniger fleckige Verfärbungen und Farbstreifen weisen jedoch jene Proben auf, welche bei einer Temperatur über 90 °C für 5 Stunden vorbehandelt wurden.

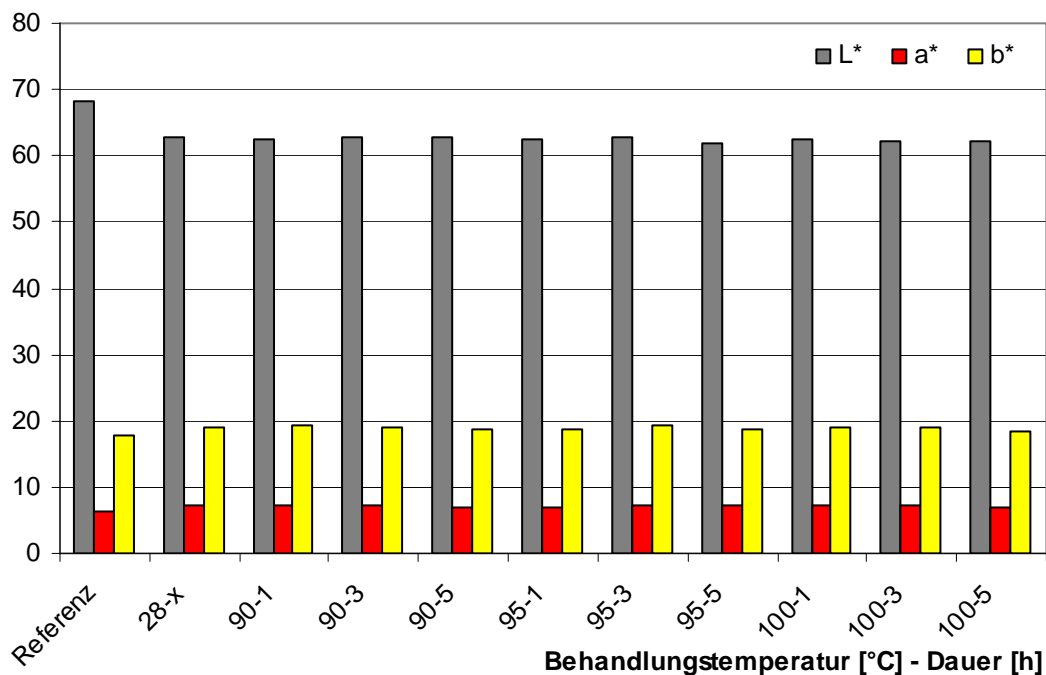


Abbildung 37: L*a*b*-Farbwerte für Eiche nach der Trocknung Nr. 201 bei unterschiedlicher Vorbehandlung

Eine Vorbehandlung mit hoher Temperatur in einer Kombiprozesskammer bringt somit durchaus Vorteile in Hinblick auf weniger Verfärbungen bei der Trocknung von sägefischem Eichenschnittholz.

Für die Trocknung Nr. 202, welche ebenfalls eine Temperaturbehandlung beinhaltet, gilt, dass diese Zwischendämpfung bei 30 % Holzfeuchte nur noch den Vorteil einer Vergleichmäßigung der Holzfeuchte der gesamten Trocknungscharge bewirkt, nicht aber mehr eine Vermeidung von Verfärbungen, wie dies durch eine anfängliche Behandlung der Fall ist.

Die Unterschiede in den Endergebnissen für die drei Trocknungsprogramme liegen nicht wie anfänglich angenommen in der Endfarbe. Trocknungsprogramm Nr. 202 bietet durch das Zwischendämpfen den Vorteil einer Vereinheitlichung der Holzfeuchte, jedoch bei einer Gesamttrockenzeit von 64 Tagen. Mit 50 und 53 Tagen Trockendauer weisen Programm Nr. 200 und Nr. 201 diese Programme deutlich kürzeren Zeitaufwand bei gleicher Endfarbe auf. Hinzu kommt, dass das Einhalten von 26 bis 28 °C in der wärmeren Jahreszeit teilweise nur durch Kühlung der Kammern und somit zusätzlichem Energieaufwand möglich ist.

6.3 Eichenverfärbung durch Pilze

Nach dem Einschnitt und der Trocknung von frischem Eichenkernholz kann in unterschiedlichen Situationen ein Auftreten von weißen Verfärbungen beobachtet werden. Die Ausbreitung dieser weißen Verfärbung verläuft in erster Linie deutlich sichtbar auf den Schnittholoberflächen. Die Eindringtiefe – anhand von Querschnitten ermittelt – ist in radialer und tangentialer Richtung äußerst gering. Zusätzlich ist häufig im Holzinneren eine weiße Verfärbung festzustellen. Diese zieht sich axial durch die gesamte Probe und erscheint sehr häufig durch den Verlauf der Jahrringe begrenzt. Derartige Verfärbungen konnten auch an einigen Proben der Trocknung Nr. 200 festgestellt werden. Das Verfärbungsmuster kommt vermutlich dadurch zustande, dass sich der Pilz, der als Verursacher der Verfärbung festgestellt wurde durch die auf der Brettoberfläche angeschnittenen Gefäße in das Holzinnere ausbreitet. Da diese streifenförmigen Farbflecken nur an Probenbrettern von Erdstämmen vorkamen, kann davon ausgegangen werden, dass die Infizierung mit dem Pilz bereits am lebenden Stamm auftrat. Entweder drang er über das Wurzelwerk in den Baumstamm ein, oder über eine Verletzung in den unteren Stammregionen.

Nach Abimpfung der Eichenproben und den anschließenden an der Technischen Universität Wien durchgeführten Untersuchungen des weißverfärbten Kernholzes lag ein starkes Pilzwachstum vor. Es wurde bestätigt, dass es sich um eine Schimmelpilzart handelte. Diese konnte eindeutig als *Paecilomyces variotii* Bain., welcher der Gruppe der Fungi imperfecti angehört identifiziert werden.

Bemerkenswert ist, dass der Pilz ein sehr hohes Temperaturoptimum aufweist und selbst nach der technischen Holz Trocknung auf dem befallenen Eichenkernholz wieder eine geringfügige Mycelbildung an der Oberfläche stattfand.

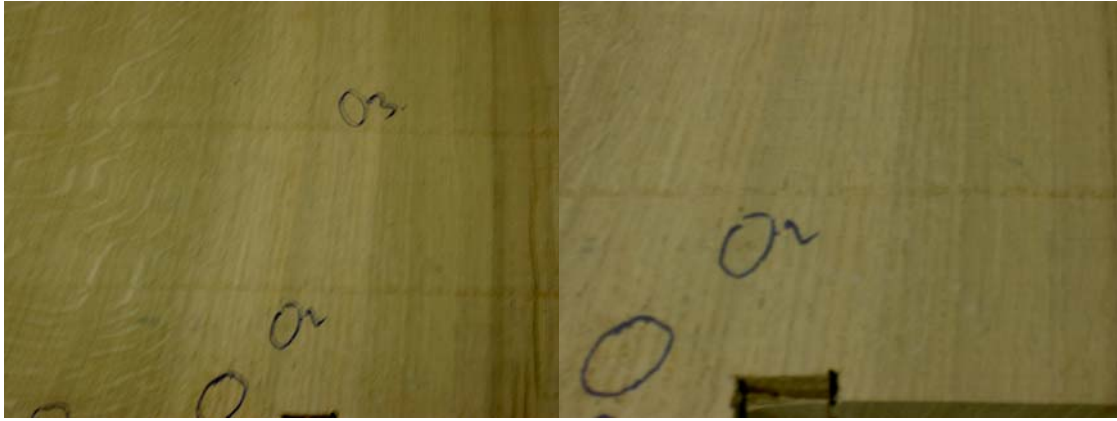


Abbildung 38: jahringbegrenzte streifige Eichenkernholzverfärbungen durch *Paecilomyces variotii*

7 Kostenabschätzung

Eine Abschätzung der Kosten und eventueller Kosteneinsparungen konnte aufgrund des engen Zeitrahmens und der begrenzten Ressourcen im Rahmen dieses Projektes nur angedacht werden. Eine Umsetzung der Ergebnisse in der Industrie erfolgte erst in der Projektendphase. Durch diesen Umstand war es nicht möglich Energieeinsparungen bzw. Ausbeuteoptimierungen objektiv mittels Messungen zu erfassen. Laufend durchgeführte Anfragen bei mehreren Laubholzverarbeitenden Betrieben führten zu keinen konkreten Ergebnissen bezüglich der Verluste durch verfärbungsbedingte Qualitätseinbußen. Verluste infolge mangelnder Qualität werden innerbetrieblich nicht detailliert nach der Ursache der Qualitätsminderung erfasst. Eine Unterteilung in Wertminderung aufgrund von Trocknungsschäden oder geringer Holzqualität liegt meist nicht vor. Mit Hilfe der aus den Expertenbefragungen erhobenen Daten kann eine grobe Abschätzung des Einsparungspotentials gemacht werden.

Geht man davon aus, dass in Österreich ca. 150.000 m³ Laubholz mit einem durchschnittlichen Marktpreis von 400 €/m³ technisch in Trockenkammern getrocknet werden, ergibt dies einen Marktwert von 60 Mio. € Erfahrungswerte aus der Praxis führen die Verluste durch Trocknungsschäden (Risse, Verzug, Verfärbungen) mit ca. 30 Prozent an. Dies bedeutet Verluste in der Höhe von 18 Mio € Eine Reduktion der Verluste durch Verfärbungen um 5 %, wie dies durch die neuen Behandlung vorsichtig geschätzt möglich ist, würde somit zu jährlichen Einsparungen von 3 Mio € österreichweit führen. Die Nutzung dieses Einsparungspotentials würde in vielen Betrieben nicht unmittelbar mit Anlageninvestitionen verbunden sein.

8 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

In Abhängigkeit von der Holzanfangsfeuchte, der Temperatur und der Einwirkzeit besteht die Möglichkeit die Holzfarbe signifikant zu beeinflussen. Ungleichmäßige Verfärbungen haben ihre Ursache im Vorhandensein von Pilzen, einer ungleichmäßigen Extraktstoffverteilung im Brett sowie dem lokalen Wirken von Enzymen. Durch eine zielgerichtete Wärmebehandlung kann die Aktivität der Enzyme für den Verfärbungsmechanismus genutzt oder auch unterbunden werden.

Trocknung

Eichenholz kann nach einer vorzeitigen Hitzebehandlung auch im frischen Zustand bereits bei höheren Temperaturen getrocknet werden ohne dabei zu Fleckenbildung zu neigen.

Onlinefarbmesssystem:

Bei der Online-Farbmessung besteht generell das Problem der Trennung zweier parallel ablaufender Prozesse, nämlich der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Farbe (Wasser im Holzgefüge verursacht eine unterschiedliche Reflexion), und Farbveränderungen durch biochemische Prozesse im Holz. Eine Online-Farbmessung für die Steuerung der Trocknung ist aus diesen Gründen nur bedingt möglich.

Einfluss der Auftautemperatur:

Streifige Verfärbungen bei anfangs gefrorenem Holz können durch eine zu Beginn niedrig gewählte Auftautemperatur für das Durchwärmen des Holzes vermieden werden. Gleichmäßige helle Farbtöne über den gesamten Brettquerschnitt sind somit auch in den Wintermonaten erreichbar.

Dämpfung

Es zeigt sich, dass sich bei einer Dämpftemperatur von 100 °C mit zunehmender Dauer vorwiegend der Helligkeitswert (L^*) verringert. Die Rot- und Gelbanteile der Versuchsproben schwanken bei gleicher Temperatur immer um Werte gleicher Größenordnung. Zum Erzielen gleicher Endfarbe bei Verwendung einer Temperatur von 80 °C muss die Haltezeit um ca. 10 Stunden verlängert werden. Auffällig hierbei ist jedoch die stärkere Streuung der Endfarben. Somit führt eine höhere Temperatur zu einer deutlich stärkeren Vergleichmäßigung der Holzfarbe als das Dämpfen bei geringerer Temperatur.

Quellungsvergütung

Durch die Veränderung der Hygroskopizität des Holzes durch das Dämpfen wird das Quell- und Schwindverhalten verringert oder zumindest zeitlich verzögert. Mit zunehmender Dämpftemperatur und -dauer wird somit eine Quellungsvergütung von Holz erreicht.

Langzeitfarbstabilität

Gedämpfte Buche vergilbt schwächer als ungedämpfte, was sich in den geringeren ΔE -Werten widerspiegelt. Für gedämpfte Buche beginnt das ΔE bereits nach ca. 9 h UV-Bestrahlungszeit asymptotisch auszulaufen, während bei ungedämpfter Buche auch nach 24 h noch keine merkliche Abschwächung des Vergilbungsprozesses zu erkennen ist.

Auch für Erle gilt analog zu den Langzeitstabilitätsversuchen von Buche, dass der Vergilbungsprozess mit zunehmender Einwirkungszeit immer langsamer vor sich geht und die Holzfarbe sich immer stärker einem Endfarbwert annähert.

Biochemische Untersuchungen

Shigometrie

Nach den shigometrischen Untersuchungen haben die unterschiedlich gefärbten Streifen (rötlich, bräunlich) verschiedene Ursachen. Die rötliche Verfärbung von Erlenholz lässt auf einen anfänglichen Pilzbefall schließen. Die Werte der bräunlichen und gräulichen Verfärbung liegen im Bereich von gesundem Erlenholz und sind somit nicht von einem Pilz verursacht.

Enzymbehandlungen

Mit einer schwach konzentrierten Laccaselösung (1 U/ml) konnte keine Verfärbung der Proben beobachtet werden. Mit der höher konzentrierten Lösung (10 U/ml) wurde feuchte Buche leicht verfärbt. Bei den Buchenproben zeigte sich eine allgemeine im Vergleich zu den Erlenproben gleichmäßigere Färbung. Des Weiteren führte die gleiche Behandlung bei trockener Buche zu dunkleren Farbtönen. Ein Einfluss der Trocknungstemperatur konnte nicht festgestellt werden. Bei Erle hingegen erhielt man mit feuchten Proben vor allem bei 100 °C Trocknungstemperatur sehr dunkle Würfel.

Extraktstoffanalysen

Die chemischen Analysen von hygothermisch behandeltem Erlenholz zeigen, dass mit zunehmender Verfärbung durch die Holz Trocknung in Richtung dunkler kein signifikanter Unterschied in der Größe des Extraktstoffgehalts festgestellt werden kann.

9 Schlussfolgerungen

Für die Durchführung der im Rahmen des Forschungsprojekts geplanten Versuche zur hygrothermischen Holzmodifikation von Schnittholz wurde eine bestehende Versuchstrockenkammer an der Universität für Bodenkultur modifiziert, modernisiert und konnte somit erfolgreich für den gesamten Projektablauf genutzt werden.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden zahlreiche Schnittholztrocknungen durchgeführt um die Vergleichbarkeit zu Industriekammern zu gewährleisten. Für die Ergebnisse des Projektes, im Besonderen neue Trocknungsprogramme für eine zielgerichtete Farbmodifikation des Holzes, bedeutet dies nun im konkreten, dass diese ohne große Aufwände in der Industrie umgesetzt werden können.

Die Erfassung der verwendeten Holzfarben in der Industrie und die damit verbundene Erstellung einer Farbkartei für die Holzarten Buche und Erle diene als Bezugspunkt und Orientierungshilfe für die kundenorientierte Erarbeitung von Dämpf-/Trockenprogrammen. Diese Farbkarteien können in einem weiteren Schritt bei der Qualitätssicherung eingesetzt werden.

Die unzureichende Information über den aktuellen Zustand der Holzfarbe während des Trocknungsprozesses muss bei den verschiedenen Regelungssystemen durch die Einbindung von entsprechenden Erfahrungswerten kompensiert werden. Diese Tatsache wirkt sich auf die Zuverlässigkeit (Vermeidung von Trocknungsfehlern) und die Effizienz (Geschwindigkeit und Energieeinsparung) der Trocknungsregelung entsprechend negativ aus. Durchgeführte Messungen und Überlegungen für die Entwicklung eines Online-Farbmesssystems liefern die Grundlage für die mögliche zukünftige Überwachung des Verfärbungsvorganges im Zuge der Trocknung.

Im Zuge der gezielten Behandlung von Holzproben mit Enzymen wurde einerseits die Theorie, dass Enzyme eine entscheidende Rolle bei der Holzverfärbung spielen nachweislich bestätigt, andererseits stellt dies neue Ansatzpunkte für Holzfärbemittel auf biologischer Basis dar.

Inhaltsstoffanalysen und shigometrische Untersuchungen liefern zusätzliches Basiswissen für das Verständnis über die Mechanismen bei der Holzverfärbung.

Im Laufe des Projekts hygrothermische Holzmodifikation wurden auch neue Anwendungsmöglichkeiten von kombinierten Dämpf-/Trockenkammern für die gezielte Farbgebung von Holz, sowie die Trocknung von Laubschnittholz unter Vermeidung von Holzverfärbungen erarbeitet. Dies stellt neue Einsatzbereiche dieser Technologie dar.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Erstellung von Trocknungsprogrammen für die Industriepartner für die gezielte Farbmodifikation des zu verarbeitenden Schnittholzes

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das definierte Projektziel – das Erstellen von Modellen zur gezielten Farbgebung von Holz mittels hygrothermischer Modifikation – sehr

zufriedenstellend erfüllt werden konnte. Die Basis für die industrielle Anwendung ist somit gegeben.

9.1 Workshops und Präsentationen

Innerhalb des Projekts wurden neben internen, d.h. mit den Projektpartnern abgehaltenen Meetings zwei Posterbeiträge sowie ein Beitrag für den Möbel- und Holzbacluster Oberösterreich erstellt. Die Endpräsentationen bei den einzelnen Firmenpartnern fanden von Mai bis Juli 2006 statt (Fa. Alfa – 28. Juni 06, Fa. WIHO – 23. Mai 06, Fa. Mühlböck – 13. Juli 06, Fa. Abalon – geplant Juli 06).

Posterbeiträge:

Poeckl, J., Grabner, M., Teischinger, A. (2005) Change of colour during hygrothermal treatment of hardwood – Online-detection of colour as a control parameter of the wood drying process. Proceedings of the second European Conference on Hardwood, Sopron, 135-137

Poeckl, J., Grabner, M., Teischinger, A., Wimmer, R. (2005) Online-detection of colour as an innovative control parameter in wood drying. Proceedings of the 2nd International Workshop on Spectral Imaging, Villach, 55-56

Artikel:

Poeckl, J. (2006) Hygrothermische Holzmodifikation – Holzfarbe nach Kundenwunsch. MHC-insider der Clusterland Oberösterreich GmbH., 81

9.2 Realisierung der Leitprinzipien

1. Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung:

Durch die Möglichkeit der gezielten Farbgebung von Laubholz kann dieser wertvolle Rohstoff gezielt nach dem optischen Erscheinungsbild im Innenbereich eingesetzt werden.

2. Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen:

Durch die bessere Ausnutzung der natürlichen Eigenschaften des nachhaltig gewachsenen Rohstoffes Holz wird die Position gegenüber Konkurrenzprodukte verbessert. Weiters wird die Nachhaltigkeit der Wälder und gleichzeitig die Kundenzufriedenheit durch bessere Ausnutzung der Möbelkomponenten gesteigert.

3. Effizienzprinzip:

Die mögliche Auswahl des am besten geeigneten Behandlungsprogramms für die gewünschte Holzfarbe (im Rahmen der Möglichkeiten der bei den einzelnen Holzarten) steigert enorm die effiziente Nutzung des Laubholzes.

4. Prinzip der Rezyklierfähigkeit:

Durch die hygrothermische Modifikation der Hölzer können diese ohne Applikation von Färbemitteln im gestalterischen Bereich vielfältig eingesetzt werden. Dies reduziert den Einsatz chemischer Behandlungsverfahren, wodurch langfristig die Rezyklierfähigkeit von Holz gesteigert wird.

5. Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit:

Die rasche Erzielung der tatsächlich gewünschten natürlichen Holzfarbe erhöht die Flexibilität, Anpassungsfähigkeit und Effizienz der verarbeitenden Betriebe.

6. Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge:

Die sichere Vorhersage der Endfarbe von Holz nach der technischen Trocknung und die geringere Streuung dieser erhöht die Kundenzufriedenheit und verringert das Risiko von Reklamationskosten.

7. Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen, und Lebensqualität:

Verbesserte Materialkenntnis und Messbarkeit tragen zur Segmentierung des Marktes bei und erhöhen das Angebot. Verbesserte Konkurrenzfähigkeit hilft mit, Arbeit und Einkommen in Forst- und Holzwirtschaft zu sichern.

10 Ausblick

10.1 Industrielle Umsetzung

Nach der erfolgreichen Modellerstellung innerhalb des Projekts wäre vor allem die industrielle Umsetzung nötig. Diese konnte aufgrund des Zeitmangels und des hohen Zeitbedarfs, den die Holz Trocknungsversuche erforderten, nicht mehr durchgeführt werden. Zusätzlich wäre es wünschenswert weitere Versuchstrocknungen durchzuführen um durch mehrmalige Wiederholung der Versuche die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen bzw. auch eine Verfeinerung der Modelle zu bewirken.

10.2 Weiterführende Untersuchungen zur hygrothermischen Holzmodifikation

Es wurde bereits begonnen weitere Parameter, die die Verfärbung von Erlen-, Buchen- und Eichenschnittholz beeinflussen können zu bestimmen. Dem Einfluss der Jahreszeit sowie radialen Trends im Baumstamm soll im Zuge einer an dieses Projekt angeschlossenen Dissertation nachgegangen werden.

Die Zusammenfassung und Erweiterung der Erkenntnisse zum Verfärbungsverhalten von Holz und generell im Bereich der technische Schnittholztrocknung ist das Ziel zukünftiger Projekte, welche an der Universität für Bodenkultur in Zusammenarbeit mit Firmenpartnern und der Kompetenzzentrum Holz GmbH. abgearbeitet werden.

Literaturverzeichnis

ALLEN (1996): Decay and Wood Utilization Problems in Red Alder and Paper Birch. In: Ecology and Mangement of B.C. Hardwoods. Workshop Proceedings. FRDA Report No. 255, 139-146

ANDERSON; FRASHOUR (1954): Sticker stain in one-inch red alder lumber. Journal of the Forest Products Research Society 4(3): 133-135

BRANDSTÄTTER (1987): Systematische Untersuchung der Trocknung des Erlenholzes zur Vermeidung von Verfärbungen. Diplomarbeit Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur

HERBERS; STINGL (2003): Untersuchungen zur Holzverfärbung von Erlenholz entlang der Wertschöpfungskette. Endbericht der Feasibility Study Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien

HERBERS; WIMMER (2004): Hygrothermische Holzmodifikation – Literaturstudie zum Thema „Holzverfärbung“. Literaturstudie Institut für Holzforschung, Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik, Universität für Bodenkultur Wien

KOLLMANN; KEYLWERTH; KÜBLER (1951): Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holz Trocknung. Holz als Roh- und Werkstoff 9(10): 382-391

VANEK (2001): Holz Trocknung am Institut für Holzforschung. Lignovisionen Band 1 – Schriftenreihe des Institut für Holzforschung – ihf gemeinsam mit dem Verband der Holzwirte Österreichs – VHÖ, Universität für Bodenkultur

WARD; SIMPSON (1999): Drying Defects. Aus: Wood Handbook - wood as an engineering material. Gen.Tech. Rep. FPL-GTR-113, Madison, WI US, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnittmuster für die Probenuntersuchungen	12
Abbildung 2: Trocknungsschema für die Buchenschnittholz Trocknung nach der Auftauphase	14
Abbildung 3: L*a*b*-Farbwerte für gedämpftes Buchenschnittholz	15
Abbildung 4: Farbstreifen aufgrund ungleichmäßiger Buchendämpfung	17
Abbildung 5: Verlauf der Holzkerntemperatur bei Buche in Abhängigkeit von der Aufheiztemperatur.....	17
Abbildung 6: Farbwerte von mit bzw. ohne Stapellatten gedämpftem Buchenschnittholz	18

Abbildung 7: Holzfeuchteverteilung von Buche vor und nach (nd) der Dämpfung bei 80 °C	19
Abbildung 8: Holzfeuchteverteilung von Buche vor und nach (nd) der Dämpfung bei 100 °C	19
Abbildung 9: Farbvergleich nach UV-Bestahlung: oben Buche gedämpft, unten Buche ungedämpft.....	20
Abbildung 10: Änderung der Holzfarbe bei (un-)gedämpftem Buchenschnittholz durch UV-Bestrahlung.....	20
Abbildung 11: Differentielle Quellung für Buche	21
Abbildung 12: L*a*b*-Farbwerte von Buche nach dem Auftauen.....	23
Abbildung 13: Farbmuster Buche nach dem Auftauen bei 40 °C für 7 h (Brettschmalseite)	23
Abbildung 14: Schnittmuster für die Untersuchungen an Erlenbrettern	26
Abbildung 15: Erlenschnittholz Trocknungsprogramm (schematisch).....	27
Abbildung 16: L*a*b*-Farbwerte der Erlenfarbmuster	29
Abbildung 17: Farbvergleiche zwischen Industrie- und Labortrockner	30
Abbildung 18: Einfluss der Freiluftvortrocknung für die weitere Farbmodifikation.....	31
Abbildung 19: Farbwerte und Holzfeuchte einer Quasi-Online-Farbmessung von Erle	32
Abbildung 20: Nachgehobeltes Erlenbrett mit Randzoneneffekt.....	32
Abbildung 21: L*a*b*-Farbwerte für hygrothermisch behandeltes Erlenholz.....	33
Abbildung 22: L*a*b*-Farbwerte für mit Enzymen behandeltes Erlenholz nach der Trocknung	34
Abbildung 23: Holzfeuchteverteilung der Erlenbretter vor und nach der Wasserlagerung	35
Abbildung 24: Soll-Farbe nach der technischen Erlenschnittholztrocknung (oben) und fleckige Verfärbung der wassergelagerten Bretter (unten)	36
Abbildung 25: Farbvergleich nach UV-Bestrahlung (0 bis 24 h) vier unterschiedlicher Erlenbehandlungen.....	36
Abbildung 26: Änderungen der Erlenholzfarbe durch UV-Bestrahlung.....	37
Abbildung 27: Alterstrend des elektrischen Widerstands über den Querschnitt von Erle (oben: Probe 5, unten: Probe 6).....	40
Abbildung 28: Ergebnisse der Buchen-Imprägnierung	44
Abbildung 29: Ergebnisse der Erlen-Imprägnierung	44
Abbildung 30: Ergebnisse des „Tropfenversuchs“	45

Abbildung 31: Extraktgehalte [%] der Erlenfarbmuster (grafische Darstellung).....	47
Abbildung 32: Extraktgehalte [%] verfärbter Holzmuster (grafische Darstellung)	48
Abbildung 33: Trocknungsschema Nr. 200 für Eiche.....	49
Abbildung 34: Trocknungsschema Nr. 201 für Eiche.....	50
Abbildung 35: Trocknungsschema Nr. 202 für Eiche.....	51
Abbildung 36: L*a*b*-Farbwerte für Eiche-Referenz und einzelne Trocknungschargen.....	52
Abbildung 37: L*a*b*-Farbwerte für Eiche nach der Trocknung Nr. 201 bei unterschiedlicher Vorbehandlung	53
Abbildung 38: jahringbegrenzte streifige Eichenkernholzverfärbungen durch <i>Paecilomyces variotii</i>	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnungsmatrix für die durchgeführten Untersuchungen	8
Tabelle 2: L*a*b*-Farbwerte der einzelnen Dämpfstufen.....	16
Tabelle 3: Behandlungsstufen für die Erlenversuchstrocknungen	27
Tabelle 4: Elektrischer Widerstand [kΩ] in den definierten Farbzonen mit der zugehörigen Farbklassifizierung	38
Tabelle 5: Elektrische Widerstandswerte von Erlenholz unterschiedlicher Zustände	41
Tabelle 6: Enzymbehandlungen für Erle und Buche.....	43
Tabelle 7: Quantitativer Vergleich der Extraktgehalte [%] der Erlenfarbmuster (s. Abb. 16).....	46
Tabelle 8: Quantitativer Vergleich der Extraktgehalte [%] verfärbter Holzmuster	47
Tabelle 9: Behandlungsstufen für die Eichenversuchstrocknung Nr. 201	50
Tabelle 10: L*a*b*-Farbwerte der Trocknung Nr. 200	52
Tabelle 11: L*a*b*-Farbwerte der Trocknung Nr. 201 (ohne Hitzevorbehandlung)	53
Tabelle 12: L*a*b*-Farbwerte der Trocknung Nr. 202	53