

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik

Holzoberflächen - Klassifizierung, Modellbildung und Umweltsimulation von optischen Eigenschaften

Thomas Schnabel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. W. Warkotsch

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. Drs. h.c. G. Wegener
2. Univ.-Prof. Dr. P. Glos, i. R.

Die Dissertation wurde am 12. 02. 2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 17. 06. 2009 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von Oktober 2006 bis Januar 2009 am Studiengang Holztechnik und Holzwirtschaft an der Fachhochschule Salzburg GmbH in Kuchl (Österreich).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Dr. habil. Drs. h.c. Gerd Wegener für die großzügige Unterstützung und die gewährten Freiheiten bei der Durchführung der Arbeit.

Herrn FH-Prof. Dr. Bernhard Zimmer danke ich für die Überlassung des Themas und das in mich gesetzte Vertrauen. Die Projektleitung motivierte mich immer wieder und hat wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Herrn FH-Prof. Dr. Alexander Johannes Petutschnigg danke ich für das freundschaftliche Verhältnis und die Unterstützung bei der mathematischen Problemlösung der unterschiedlichen Fragestellungen dieser Arbeit.

Für die freundschaftliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe und die kollegiale Zusammenarbeit danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Studienganges Holztechnik und Holzwirtschaft. Besonders bedanke ich mich bei Herrn Herbert Irrnberger und Herrn Thomas Wimmer für die Unterstützung bei den Laborarbeiten, sowie bei Herrn Dipl.-Holzwirt Helmut Bächle, Herrn Dipl.-Ing. silv. univ. Josef Lohr und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gernot Standfest für ihre vielen wertvollen Hinweise.

Die Arbeit wurde im Rahmen des Strukturaufbau-Vorhabens „Werkstoffe aus Holz - Aufbau eines Kompetenzschwerpunktes“ über das Impulsprogramm FHplus Aufbauprogramm der Österreichischen Forschungs-Förderungs-Agentur (FFG-Nr. 811450) finanziell unterstützt.

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau Christa und meiner Tochter Johanna für das Verständnis und den Rückhalt, die sie mir jederzeit zukommen ließen.

Kurzfassung

Holzoberflächen - Klassifizierung, Modellbildung und Umweltsimulation von optischen Eigenschaften

Die Farbe von Holzoberflächen wurde als Beurteilungsmerkmal bei unterschiedlichen Verwendungen quantifiziert. Die Veränderungen der Farbwerte von mehreren Holzarten wurden bei einer thermischen Modifikation, einer einjährigen Nutzungsdauer im Innenbereich und einer zweijährigen Bewitterung an unterschiedlichen Standorten im Außenbereich untersucht. Durch die Entwicklung und Anwendung von mathematischen Methoden wurden eine Klassifizierung, eine Modellbildung und eine Visualisierung der Veränderungen von Holz in Abhängigkeit verschiedener Fragestellungen erreicht.

Wood Surfaces - Classification, Modelling and Artificial Weathering of Optical Properties

The colour of wood surfaces was quantified in order to be used as one principle basis for the assessment of various applications. The changes in colour of several wood species were analysed during a thermal modification process, a one-year life of indoor use, and two years of weathering in different exterior locations. Through the development and application of mathematical methods it was possible to determine the classification, modelling and visualization of the changes in wood in relation to various issues.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	ii
1 Hintergrund und Forschungsschwerpunkte	1
2 Stand des Wissens	10
2.1 Vorkommen und Bedeutung der verwendeten Holzarten in Deutschland und Österreich	10
2.2 Eigenschaften und Verwendung von Hölzern	13
2.2.1 Anatomie des Holzes	13
2.2.1.1 Makroskopische und mikroskopische Struktur	13
2.2.1.2 Ultrastruktur des Holzes	16
2.2.2 Chemischer Aufbau	18
2.2.3 Holztechnologische Eigenschaften	20
2.3 Einflussfaktoren bei der Holzverwendung	22
2.3.1 Holzqualität und Design	23
2.3.2 Auswirkungen der Temperatur unter 300°C und darüber	23
2.3.3 Auswirkungen der Lichtstrahlung	25
2.3.3.1 Sichtbare strukturelle Veränderungen	25
2.3.3.2 Chemische Veränderungen	26
2.3.3.3 Bildung freier Radikale	27
2.3.3.4 Abbaumechanismen	27
2.3.3.5 Vergilbungsreaktionen	28
2.3.4 Auswirkungen der Feuchtigkeit	30
2.3.5 Auswirkungen durch Säuren und Basen	30
2.3.6 Auswirkungen von holzerstörenden Pilzen	31

2.4	Veränderungen der Oberfläche bei der Verwendung von Vollholz	32
2.4.1	Überblick der Veränderungen im Außenbereich	32
2.4.2	Überblick der Veränderungen im Innenbereich	34
2.4.3	Überblick der Veränderungen bei der Holzmodifikation	34
2.4.3.1	Harzvergütung	35
2.4.3.2	Verkieselung	35
2.4.3.3	Acetylierung	36
2.4.3.4	Hitzevergütung	37
2.5	Farbwahrnehmung von Oberflächen	38
2.5.1	Physiologische Aspekte der Farbwirkung	39
2.5.2	Subjektivität der Farbempfindung	39
2.5.3	Farbmetrik	40
2.5.4	Farbmessung von Holzoberflächen	40
2.5.4.1	Anwendungen eines Photospektrometers	42
2.5.4.2	Anwendung eines Spektrometers mit Lichtwellenleiter	43
2.5.4.3	Anwendung einer Zeilenkamera oder Scanner	44
2.6	Objektivierung von Veränderungen	44
2.6.1	Prüfverfahren	44
2.6.1.1	Freibewitterung	45
2.6.1.2	Umweltsimulation	45
2.6.2	Bewertung der Veränderungen oder Messung von Materialeigenschaften	46
2.6.3	Mathematische Modelle	47
3	Material und Methoden	49
3.1	Material	49
3.1.1	Probenmaterial für die Analyse der Messbereiche	49
3.1.2	Probenmaterial für die Darstellung der visuellen Farbwahrnehmung	49
3.1.3	Probenmaterial für Klassifizierung thermisch modifizierter Laubhölzer	50
3.1.4	Probenmaterial für die Untersuchung der Verfärbung	51
3.2	Methoden	52
3.2.1	Sonnenbestrahlung hinter Glas	52
3.2.2	Freibewitterung	53
3.2.3	Simulation von Umwelteinflüssen	56
3.2.4	Visuelle Beurteilungen	58

3.2.4.1	Kategorisierung der Veränderungen	59
3.2.4.2	Quantitative Bestimmung der Veränderungen	59
3.2.4.3	Dokumentation visueller Veränderungen der Holzoberfläche	59
3.2.5	Bestimmung der Holzfarbe	60
3.2.6	Durchführung des Vergleiches der visuellen Farbempfindung und den Mess- werten	61
3.2.7	Bestimmung einiger wichtiger holztechnologischer Kenndaten	62
3.2.7.1	Rohdichte (r_u)	62
3.2.7.2	Holzfeuchte (u)	63
3.2.8	Datenanalyse	63
3.2.8.1	Deskriptive Statistik	63
3.2.8.2	Test auf Normalverteilung	64
3.2.8.3	Mann Whitney U-Test	64
3.2.8.4	Varianzanalyse	65
3.2.8.5	Clustermethode	65
3.2.8.6	Nichtparametrische Regression	66
3.2.9	Bilderzeugung	66
4	Ergebnisse und Diskussion	68
4.1	Einfluss des Messbereiches der Farbmessung an Holzoberflächen	68
4.1.1	Einfluss der Messfläche	68
4.1.2	Auswirkungen der radialen und tangentialen Oberfläche	71
4.1.3	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse über den Messbereich der Farbmessung an Holzoberflächen	77
4.2	Klassifizierung von Hölzern über Farbmessung	78
4.2.1	Erkennung und Klassifizierung von Behandlungsintensitäten am Beispiel der Qualitätskontrolle von thermisch modifizierten Hölzern	78
4.2.2	Unterscheidung von Holzarten durch Farbmessung und Klassifizierung	83
4.2.2.1	Fichte und Tanne	83
4.2.2.2	Douglasie und Lärche	85
4.2.3	Zusammenfassende Analyse über die Klassifizierung mittels Farbmessung	86
4.3	Visuelle Wahrnehmung der Farbveränderungen	87
4.3.1	Douglasie	87
4.3.2	Eiche	88

4.3.3	Fichte	89
4.3.4	Lärche	90
4.3.5	Tanne	91
4.3.6	Diskussion der visuellen Farbwahrnehmung	92
4.3.7	Zusammenfassende Betrachtung der visuellen Wahrnehmung der Farbänderung	92
4.4	Veränderungen von Holzoberflächen durch Lichtstrahlung	94
4.4.1	Feststellung der Verfärbungen von Holzoberflächen hinter Glas	94
4.4.1.1	Thermisch modifizierte Edelkastanie	94
4.4.1.2	Thermisch modifizierte Esche	95
4.4.1.3	Eiche	97
4.4.1.4	Fichte	98
4.4.1.5	Lärche	99
4.4.1.6	Tanne	100
4.4.1.7	Unterschiedliche Fensterglassysteme	101
4.4.1.8	Abschließende Diskussion der Verfärbungen von Holzoberflächen hinter Glas	103
4.4.2	Simulation der Verfärbungen von Holzoberflächen im Innenraum mit UV- Strahlung	104
4.4.3	Abschließende Diskussion der Simulation der Verfärbungen von Holzober- flächen im Innenraum	109
4.4.4	Einfluss der Strahlungsverteilung unterschiedlicher Lampentypen	111
4.4.4.1	Eiche	111
4.4.4.2	Fichte und Tanne	112
4.4.4.3	Douglasie und Lärche	115
4.4.5	Zusammenfassende Betrachtung über die Auswirkungen der Lichtstrahlung auf Holzoberflächen	117
4.5	Veränderungen im Außenbereich	118
4.5.1	Mikroskopische Beurteilung der Veränderungen von Holzoberflächen wäh- rend der Freibewitterung	118
4.5.2	Analyse der Rissbildung während der natürlichen Bewitterung	125
4.5.3	Feststellung der Farbveränderungen während der Freibewitterung an verschie- denen Standorten	128
4.5.4	Modellierung der Veränderungen	131

4.5.5	Einfluss der Witterung auf die Farbverschiebung unterschiedlicher Holzarten	133
4.5.5.1	Einfluss des Auslegungszeitpunktes auf die Veränderungen an Holzoberflächen	137
4.5.5.2	Einfluss der unterschiedlichen Probenausrichtungen auf die Farbveränderung	141
4.5.5.3	Untersuchung des Farbverlaufes an zwei unterschiedlichen Standorten	142
4.5.6	Umweltsimulation der natürlichen Veränderungen im Labor	143
4.5.6.1	Einfluss der UV-Bestrahlung in Verbindung mit Wasser	143
4.5.6.2	Einfluss der Wasserbesprühungszeit und Bestrahlungsstärke	146
4.5.6.3	Einfluss des pH-Wertes bei der Umweltsimulation	151
4.5.6.4	Vergleich der Auswirkungen einer Freibewitterung mit einer Umweltsimulation	153
4.5.7	Umweltsimulation thermisch modifizierter Laubhölzer	155
4.5.8	Zusammenfassende Betrachtung der Auswirkungen der natürlichen Bewitterung im Außenbereich und deren Simulation im Labor	157
4.6	Visualisierung der Farbveränderungen	159
5	Schlussfolgerungen	163
6	Zusammenfassung	165
	Literaturverzeichnis	169
	Abbildungsverzeichnis	192
	Tabellenverzeichnis	200
	Formelverzeichnis	202
A	Anhang	203
A.1	Abkürzungsverzeichnis	203
A.2	Abbildungen	204
A.3	Vorträge und Veröffentlichungen	205
A.4	Lebenslauf	206

1 Hintergrund und Forschungsschwerpunkte

Die Verwendung von Holz hat eine lange Tradition und es zählt zu den ältesten Baustoffen der Menschheit. Es ist nicht verwunderlich, dass die Menschen Empfindungen wie Wärme, Natürlichkeit und Geborgenheit mit dem Holz assoziieren (Rice et al. 2006). Sein visueller Eindruck, die leichte Bearbeitbarkeit und das günstige Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht, um nur einige seiner



Abbildung 1.1: Fokus der Arbeit auf die Anwendungen von Holz im Innenbereich (etwa Fußböden) und Außenbereich (z.B. Fassadenanwendungen)

positiven Eigenschaften zu nennen, machen es für viele Anwendungen im Innen- und Außenbe-

reich attraktiv (Abbildung 1.1). Gerade in der zeitgenössischen Architektur erlebt Bauen mit Holz eine Renaissance und weltweit haben Architekten und Bauherren das Holz als innovatives Material wiederentdeckt (Billand 2007).

Studien von Mantau und Kaiser (2002a;b) zum Schnittholzeinsatz auf dem deutschen Modernisierungsmarkt im Außenbereich (etwa Fassaden, Außentüren und Palisaden) ergaben eine hochgerechnete Menge von ungefähr 2,3 Millionen m³ Schnittholz, davon entfallen auf Nadelholz etwa 80% und auf Laubholz rund 20%. Im Innenbereich werden geschätzte 1,4 Millionen m³ im sichtbaren Bereich (z. B. Wandbekleidungen, Fußböden und Türen) für Renovierung und Neuerrichtung verwendet.

Wie auch andere Werkstoffe, so weist Holz einige Besonderheiten auf, die bei der Planung und Verarbeitung berücksichtigt werden müssen. Eine stets gleichbleibende Beschaffenheit von Holz kann nicht erwartet werden. Der strukturelle Aufbau des Holzes ist verantwortlich für die unterschiedlichen technologischen Eigenschaften in den drei Richtungen (axial, radial und tangential). In Abhängigkeit des Feuchtegehaltes der Umgebungsluft ändert sich der Wassergehalt in der Holzstruktur und es stellt sich ein Gleichgewicht ein, dabei ändert sich auch die Dimension des Holzes, es quillt oder schwindet. Gleichzeitig mit der Zunahme der Holzfeuchte bis zum Fasersättigungspunkt (Wassereinlagerung erfolgt in den Zellwänden) nehmen die Werte der Biegefestigkeit ab (Niemz 1993).

Entsprechend der jeweiligen Anwendung werden an das Holz unterschiedliche Anforderungen gestellt. Neben den mechanischen, bauphysikalischen und akustischen Erfordernissen kann das optische Erscheinungsbild ein wichtiges Kriterium sein. Um den Anforderungen bestmöglich zu entsprechen und einen erweiterten Einsatzbereich von Holz zu ermöglichen, führte dies zur Entwicklung von Verfahren, die die Eigenschaften des Holzes verbessern sowie zur Definition von Qualitätsklassen, etwa nach der Festigkeit und Tragfähigkeit.

Die Entwicklung von Holzwerkstoffen in Form von Lagenholz, Span- und Faserplatten sowie Formteilen aus Spänen und Fasern stellen eine Möglichkeit dar, bestimmte Materialeigenschaften durch eine gezielte Variation der Werkstoffstruktur zu erreichen. Mit zunehmender Zerkleinerung des Ausgangsmaterials erfolgt eine Homogenisierung der Holzwerkstoffe und deren Eigenschaften.

Eine Eigenschaftsvergütung wird z. B. durch das Dämpfen erreicht. Diese Methode ist häufig vor dem Furnierprozess und vor dem Holzbiegen etwa zur Sesselproduktion vorgelagert, um eine Plastifizierung zu erreichen. Außerdem wird der Abbau von Spannungen im Holz, eine Vergleichmäßigung der Holzfeuchte, eine Homogenisierung der Farbe und eine Farbänderung erreicht. Weitere gezielte Veränderungen erfolgen durch die Holzmodifikation. Hill (2006) definierte die Holzmo-

difikation als Reaktion von chemischen, biologischen und physikalischen Einflüssen auf das Holz und einer resultierenden Verbesserung der gewünschten Eigenschaften. Die eigentliche Modifikation führt zu den stärksten Veränderungen der natürlichen Holzstruktur und der Holzeigenschaften (Rapp et al. 2000). Neue Einsatzgebiete und eine Erhöhung der Gebrauchsdauer werden durch die modifizierten Hölzer erwartet (Hogl und Schwarzbauer 2002), beispielsweise sind vor allem die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität zu nennen. Ein weiterer positiver Effekt bei einigen Modifikationen (z. B. Acetylierung und Harzvergütung) ist die verbesserte UV-Beständigkeit und die Veränderung des visuellen Eindruckes. Häufig verändert sich auch der Farbton bei der Vergütung, was bei thermisch behandelten Hölzern zu einer dunklen Färbung (Abbildung 1.2) je nach Behandlungsintensität führt und so diese Hölzer als Substitutionsprodukte für Tropenholz gesehen werden.



Abbildung 1.2: Farbunterschiede bei unbehandelten und wärmebehandelten Buchenbohlen

Huth (2006) beziffert den steigenden Absatz von thermisch behandelten Hölzern in Deutschland mit 11.800 m³, wobei mehr als zwei Drittel dieser Menge importiert werden. Dabei hebt sich die Buche bei den verwendeten Holzarten hervor. Die behandelte Buche wird nicht nur für Terrassenbe-

läge im Außenbereich eingesetzt, sondern auch für Möbel und Fußböden im Innenbereich verwendet. Ebenso weisen Esche und Eiche eine Steigerung der Produktionsmengen auf. Bei der industriellen Produktion des relativ jungen Produktes „thermisch modifiziertes Holz“ werden die Prozessbedingungen überwiegend durch Erfahrungswerte definiert. Durch Verwendung unterschiedlicher Holzarten und Holzdimensionen besteht die Gefahr einer zu leichten oder zu starken Behandlungsintensität. Eine objektive Beurteilung des Behandlungserfolges ist dadurch schwierig und derzeit wurde noch keine einheitliche Klassifizierung nach definierten Kriterien erfolgreich umgesetzt. Jedoch ist eine Norm für thermisch modifiziertes Holz - Definitionen und Eigenschaften - im Entwurf (DIN CEN/TC 15679 (2008)).

Eine Klassifizierung nach Merkmalen steigert die Anwenderfreundlichkeit, die Einsatzmöglichkeiten und die Qualitätssicherheit. Holzsortierung hat sich längst etabliert und wird durch Regelwerke festgelegt, beispielsweise die DIN 4074 für die Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Tegernseer Gebräuche und Österreichische Holzhandelsusancen nach optischen Kriterien. Größere Produktionskonzentrationen, Leistungssteigerungen und Kosteneinsparungen bei der Holzverarbeitung lassen wenig Raum für eine händische und visuelle Sortierung. Forschungsansätze für die Entwicklung neuer praxistauglicher Algorithmen und Messgeräte zur maschinellen Klassifizierung werden laufend umgesetzt (Glos und Schulz 1980; Szymani und McDonald 1981; Glos und Burger 1998; Kline et al. 2003; Glos et al. 2006). Zur Sortierung nach mechanischen Eigenschaften werden meist aufwendige Gerätschaften mit einer Anzahl unterschiedlicher Messmethoden (z. B. Röntgenscanner, Zeilenkamera) verwendet. Eine Einteilung in Qualitätsklassen kann auch prinzipiell nach optischen Kriterien (etwa Holzmerkmalen, Farbe) maschinell erfolgen. Brunner et al. (1990), Plinke (1999) und Rinnhofer (2004) zeigten mögliche Potentiale und Schwierigkeiten für eine Klassifizierung von Holz nach der Farbe während der Verarbeitung auf.

Gefordert ist aber nicht nur eine Einteilung nach Qualitätsmerkmalen, sondern auch eine objektive Beurteilung von Veränderungen bei der Anwendung und eine Abschätzung der Veränderungen über den Produktlebenszyklus bei unterschiedlichen Beanspruchungen. Vogl (1999) beziffert die relativen Kosten für die Entdeckung von Zuverlässigkeitsproblemen schon bei der Entwicklung neuer Produkte um den Faktor 1.000 kleiner gegenüber der Aufdeckung der Mängel durch den Kunden. Untersuchungen bei materialspezifischen Veränderungen während der Anwendung fördern das Vertrauen der Endkunden in den Werkstoff, Reklamationen werden vermieden und die Kosten für Nachbesserungen gesenkt.

Holz unterliegt wie alle Werkstoffe einem Abbauprozess, der die Materialeigenschaften verändert. Im Außenbereich ist die natürliche Dauerhaftigkeit der Holzarten ein wesentliches Kriterium. Der

Begriff „natürliche Dauerhaftigkeit“ wird im täglichen Sprachgebrauch als Widerstandsfähigkeit des Holzes gegen mechanische, chemische und biologische Einflüsse verstanden. Bavendamm (1963) definierte die natürliche Dauerhaftigkeit als die Widerstandsfähigkeit gegen Pilzbefall und Tierfraß. Für die praktische Anwendung wurde versucht, die Holzarten in unterschiedliche Klassen der Dauerhaftigkeit einzuteilen. Dieses Konzept wurde in der DIN EN 350-2 umgesetzt, die angeführten Dauerhaftigkeitsklassen sind überwiegend in Labor- und teilweise in vereinzelt Freilanduntersuchungen im Erdkontakt bestimmt worden. Die mit Erdkontakt ermittelten Dauerhaftigkeitsklassen können nicht ohne weiteres auf Dauerhaftigkeitsklassen von bewittertem Holz ohne Erdkontakt übertragen werden (Rapp und Augusta 2000). Alte norwegische Stabkirchen aus Holz, die nach einigen Jahrhunderten ihren Verwendungszweck noch erfüllen, sind allgemein bekannte Beispiele. Dendrochronologische Untersuchungen zeigten, dass profane Holzbauwerke aus dem 14. und 15. Jahrhundert in Tirol und Südtirol ebenso erhalten sind. Dabei kamen meist Fichten- und Lärchenholz zum Einsatz (Pichler und Nicolussi 2006). Die kleine Auswahl an Beispielen lässt erkennen, dass auch ein nach DIN EN 350-2 nicht dauerhafter eingestuft Rohstoff eine lange Gebrauchsdauer aufweisen kann, und wer kennt nicht das grausilbrige, rohe Holz an alten Gebäuden und Brücken, das seinen Objekten eine ganz besondere Ausstrahlung verleiht (Abbildung 1.3). Der Endfarbton „grausilbrig“ wird von Kunden an Holzoberflächen akzeptiert und ist durchaus erwünscht (Schober und Lackner 2004; Arndt 2006). Die moderne Architektur greift auf das natürliche Altern von Holzoberflächen zurück (Billand 2007). Kaufmann (2001) spricht von einem „Hineinaltern“ der Gebäude in die Umgebungslandschaft und von einer Patina, die das Holz umgibt.

Abbildung 1.3 zeigt drei unterschiedliche Holzhäuser nach einer Gebrauchsdauer von 7-10 Jahren. Diese Projekte wurden teilweise mit verschiedenen Holzbaupreisen ausgezeichnet und heben die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten von Holz hervor. Es sind aber nicht alle Fassaden vergraut. Detaillierte Aussagen über den Vergrauungsprozess oder die Farbänderungen von verschiedenen Holzarten sind nach derzeitigem Wissensstand schwierig zu treffen. Unterschiedliche Wege der Farbänderung können bei Holz auftreten und das ästhetische Erscheinungsbild beeinflussen. Selbst im Innenbereich verändern Holzoberflächen ihre optischen Eigenschaften und somit ihre gestalterische Aussage. In der Regel setzt der Endkunde eine homogene Farbgebung und eine Lichtechtheit seiner erworbenen Produkte voraus oder toleriert eine langsame und im Verlauf kaum wahrnehmbare gleichmäßige Verfärbung. Das Verschieben eines Teppiches oder Umhängen eines Bildes kann diese Veränderung dann abrupt sichtbar machen (Abbildung 1.4), wobei ein Schutz durch Beschichtungen vielfach nicht erreicht wird (Devantier und Emmler 1997). Häufig sind die Endkunden durch dieses Verhalten überrascht und fordern Informationen über das Ausmaß der Ver-



Abbildung 1.3: Verwitterte Holzfassaden im Außenbereich ©Kaufmann

änderungen und Hilfestellung. Dabei verfärben sich die Holzarten bei künstlicher Lichtbestrahlung unterschiedlich, einige werden heller und andere werden dunkler (Sandermann und Schlumbom 1962b). Verfärbungen im Innenbereich werden meist im Labor simuliert, jedoch nicht mit den Auswirkungen durch Sonnenlicht im Innenraum verglichen. Normales Fensterglas (Floatglas) filtert einen Teil der kurzwelligigen Sonnenstrahlung heraus. Weiterentwicklungen sind Glassysteme (Isoliergläser), die hauchdünn mit Metallpulver bedampft sind und eine veränderte Lichttransmission aufweisen. Unterschiedliche Eigenschaftsveränderungen gegenüber herkömmlichem Fensterglas könnten die Folgen sein.

Für viele Anwendungen spielen die optische Eigenschaften von Holzoberflächen eine wichtige Rolle. Franke (1993) definierte die optischen Eigenschaften für Papier, bei einer Umlegung der Definition auf Holzoberflächen reduzieren sich die Eigenschaften auf Glanzvermögen und Farbe, wobei der



Abbildung 1.4: Vergleich von Farbänderungen bei geöltem Eschenfußboden

Glanz von unbeschichtetem Holz wenig Informationsgehalt enthält.

Die Farbe von Materialien spielt bei vielen Anwendungen eine entscheidende Rolle und wird zur Beurteilung von Veränderungen herangezogen. Bei der Holzmodifikation wird eine Farbänderung in Kauf genommen oder bewusst herbeigeführt. Die naturbelassene Holzfassade ist durch ein ökologisches und ökonomisches Umdenken wieder gesellschaftsfähig. Seine materialspezifischen Veränderungen bei der Verwendung machen Holz zu einem einzigartigen Werkstoff im Innen- und Außenbereich. Detaillierte Untersuchungen und Abschätzungen über Veränderungen sind für die Materialien wichtig. Damit können falsche Einsatzgebiete, Reklamationen und unrichtige Schlussfolgerungen verhindert werden und gleichzeitig die Produktqualität und die Kundenzufriedenheit erhöht werden.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wurden folgende Forschungsschwerpunkte für diese Arbeit formuliert:

Einfluss des Messbereiches auf die Farbmessung an Holzoberflächen

Eine praxisnahe Bestimmung der Farbe an Oberflächen ist immer auf einen kleinen Messbereich beschränkt, was für die Farbmessung bei homogenen Materialien kein Nachteil ist. Holzoberflächen können nicht als einheitlich bezeichnet werden. Bei Verwendung unterschiedlicher Messbereiche können die Ergebnisse der Farbmessung stark differieren. Ein Einfluss des Messbereiches auf die Farbmessung ist zu klären.

Klassifizierung von Hölzern

Bei einer thermischen Modifikation ändert sich die Farbe in Abhängigkeit der Behandlungstempera-

turen. Derzeit wird häufig eine Sortierung nach den Behandlungsintensitäten über den Parameter der Temperatur durchgeführt, ohne eine Bestimmung von Materialeigenschaften. Für Maßnahmen der Qualitätssicherung ist eine Definition von Beurteilungsmerkmalen entscheidend. Die Messung der Farbe könnte ein geeignetes Kriterium sein. Eine Klassifizierung der einzelnen Behandlungsstufen könnte durch die Farbwerte erfolgen, so wäre die Einteilung in Qualitätsklassen nach optischen Eigenschaften möglich. Die automatisierte Bestimmung von Holzarten ist nach dem gegenwärtigen Stand der Technik möglich. Bei Holzarten, die ein vergleichbares optisches Erscheinungsbild (etwa Fichte und Tanne) aufweisen, können sowohl bei einer händischen als auch bei einer maschinellen Sortierung Fehlbeurteilungen auftreten. Dabei könnte die Farbe ein wichtiges und in der Praxis problemlos messbares Klassifizierungsmerkmal sein.

Verfärbungen von Holzoberflächen im Innenbereich durch Lichtstrahlung

Die Strahlung wird durch das Fenstersystem unterschiedlich stark gefiltert und die Holzoberfläche verfärbt differenziert. Bei thermisch behandeltem Holz wird eine höhere Farbstabilität angenommen. Die Feststellung der tatsächlichen Verfärbungen an Holzoberflächen hinter Glas wird an zwei Standorten in einem Zeitraum von einem Jahr erfasst. Diese Ergebnisse sollen als Grundlage für die Farbänderungen bei Simulationsversuchen dienen. Anhand von unterschiedlichen Bestrahlungsvarianten (z. B. Bestrahlungsspektrum) sollten möglichen Differenzen bei der Farbverschiebung aufgezeigt werden.

Veränderungen im Außenbereich

Die Umwelteinflüsse im Außenbereich sind vielfältig, dementsprechend sind die Auswirkungen auf die Materialeigenschaften variierend. Dadurch kann eine große Varianz der Messwerte auftreten, was für eine Analyse der Veränderungen Schwierigkeiten bereiten kann. Zusammenhänge über Einflüsse und Auswirkungen zu untersuchen, sind bei zeitlichen Messreihen mit einer großen Streuung der Datensätze nicht ohne weiteres möglich und abhängig von der Findung mathematischer Modelle. Für die Modellierung von Veränderungen über die Zeit können unterschiedliche Ansätze verwendet werden. Dabei eignet sich nicht jeder Umweltparameter für eine mathematische Modellierung der Materialveränderungen.

Analyse der Umweltsimulation

Durch Simulationsverfahren können gezielt einzelne Umwelteinflüsse gesondert betrachtet werden. Folglich kann sich ein detailliertes Bild der Zusammenhänge zwischen Einflüssen und Auswirkun-

gen ergeben. Die wichtigsten Umwelteinflüsse, wie Lichtstrahlung, Niederschlag und Säureeinwirkung, werden simuliert und gegenüber gestellt.

Visualisierung der farblichen Veränderungen von Holzoberflächen

Vorausgesetzt die Farbveränderungen können durch mathematische Modelle beschrieben werden, können die Veränderungen durch Schätzparameter der Datensätze ermittelt werden. Diese geschätzten Werte können mittels Bildbearbeitungssoftware für die Erzeugung von Bildern verwendet werden. Durch diese Methode könnten die Veränderungen einfach visualisiert werden und in CAD (Computer-Aided-Design) Programme für die Darstellung von Objekten aus Holz eingearbeitet werden.

Aus diesen Forschungsschwerpunkten wurden die Ziele der Arbeit hergeleitet:

- Bestimmung des Einflusses des Messbereiches auf die Farbmessung an Holzoberflächen
- Klassifizierung von Hölzern über Farbmessung
- Quantifizierung der Farbveränderungen von Holzoberflächen durch Lichtstrahlung
- Bestimmung der sichtbaren Veränderungen an Holzoberflächen im Außenbereich
- Analyse der unterschiedlichen Einflüsse durch die Umweltsimulation an Holzoberflächen
- Entwicklung einer Methode zur Analyse der zeitlichen Veränderungen der Materialeigenschaften
- Entwicklung einer Vorgehensweise für die Visualisierung der Farbveränderungen an Holzoberflächen im Außenbereich

2 Stand des Wissens

Die zweite Bundeswaldinventur im Jahre 2002 ermittelte in Deutschland rund 31,0 % der Landesfläche als Waldfläche (Polley et al. 2005). Österreich weist einen höheren Prozentsatz der Waldfläche auf und liegt bei 47,2 % laut der Waldinventur 2000/02 (Prem 2004). In beiden Ländern ist eine Zunahme der Waldfläche erkennbar.

2.1 Vorkommen und Bedeutung der verwendeten Holzarten in Deutschland und Österreich

In Tabelle 2.1 wird ein Überblick der Baumartenverteilung und des Holzvorrates im Wirtschaftswald in Deutschland und Österreich gegeben.

Buche (Rotbuche, *Fagus sylvatica* [L.]) gehört zur Familie der Fagaceae (Wagenführ 2000). Als Arealschwerpunkt wird Mittel- und Westeuropa genannt. Im Norden des Verbreitungsgebietes ist die Buche ein Baum des tieferen Hügellandes, im Süden dagegen ein ausgeprägter Gebirgsbaum (Mayer 1992). Die Buche ist in Europa von großer Bedeutung. Gemessen an ihrer Flächenausdehnung ist die Buche die häufigste Laubbaumart in Deutschland und Österreich. Infolge des Umbaus nicht standortgerechter Nadelbaumbestände zu Laub- und Mischwaldbeständen hat die Buchenfläche zugenommen. Die Holzart hat neben der Fichte das zweitgrößte potenzielle Rohholzaufkommen in Deutschland und Österreich (Prem 2004; Polley et al. 2005).

Tabelle 2.1: Vorkommen und Bedeutung der untersuchten Baumarten in Deutschland und Österreich (Prem 2004, Polley et al. 2005)

	Deutschland			Österreich		
	Baumartenverteilung		Vorrat	Baumartenverteilung		Vorrat
	[ha]	(%)	[m ³ /ha]	[ha]	(%)	[Vfm/ha]
Buche	1.564.806	(14,8)	352	289.000	(9,7)	351
Douglasie	179.607	(1,7)	274	-	-	-
Edelkastanie	- ¹	-	-	-	-	-
Eiche	1.101.555	(9,6)	286	51.000	(1,7)	523
Esche	-	-	-	216.000	(7,0)	-
Fichte	2.978.203	(28,2)	404	1.675.000	(56,3)	402
Lärche	297.787	(2,8)	301	119.000	(4,0)	615
Tanne	162.016	(1,5)	480	72.00	(2,4)	666

¹ Daten nicht vorhanden

Das natürliche Verbreitungsgebiet der Douglasie reicht von British Kolumbien bis Mexico, im Felsengebirge vom 23.-25. und der pazifischen Küste vom 38.-51. nördlichen Breitengrad (Mayer 1992). Im Jahre 1912 wurde ein Anbauversuch der Douglasie aus unterschiedlichen Herkunftsgebieten mit dem Ziel der Feststellung der Anbauwürdigkeit in Deutschland gestartet (Stimm und Dong 2001). Die gute Vitalität und die Wuchseigenschaften führten unter anderem zu einer Baumarten- und Herkunftsempfehlung der vridis-Douglasie („grüne“ Küstendouglasie). Die Ergebnisse der Bundeswaldinventur im Jahre 2002 zeigen ein Ansteigen der Douglasienflächen auf rund 180.000 ha. Dabei kann die Douglasie den höchsten Zuwachs in den einzelnen Altersklassen aufweisen (Polley und Kroiher 2006). Inzwischen gilt die Douglasie als eingebürgerte Baumart in Baden-Württemberg (Teuffel und Kastrup 1998). In Österreich sind einige Bestände mit Douglaisen bestockt, wurden jedoch nicht in der Waldinventur erhoben.

Die Edelkastanie (*Castanea sativa* [Mill.]) gehört zur Familie der Fagaceae (Wagenführ 2000). Das Ausbreitungsgebiet erstreckt sich vom südlichen Mitteleuropa von Frankreich bis zur Ukraine (Mayer 1992). Die Baumart benötigt ein warmes, wintermildes ausreichend niederschlagsreiches Klima. Vor allem in den südlichen Ländern Europas ist die Edelkastanie ein wichtiger Frucht- und Nutzholzbaum (Grosser 2003). In den Waldinventuren von Deutschland und Österreich wird die Edelkastanie nicht ausgewiesen.

Die europäische Eiche gehört zur Familie der Fagaceae und die Gattung *Quercus* kann in etwa 250 Arten unterteilt werden (Wagenführ 2000). *Quercus robur* [L.] (Stieleiche) und *Quercus petraea*

[Matt] Liebl. (Traubeneiche) sind Bastardierungen der Gattung und können mikroskopisch nicht getrennt werden. Die Eiche ist eine Baumart der Tieflagen und hat ein großes Verbreitungsgebiet in Europa. Dieses Areal reicht von Nordspanien über Irland bis zur Wolga in Russland (Mayer 1992). Die Eiche ist nach dem Holzvorrat und Holzaufkommen die zweithäufigste Laubbaumart nach der Buche und hat eine Fläche von rund 1 Million ha in Deutschland. In Österreich sind vor allem die Bestände im Wienerwald, Burgenland und Südsteiermark von Bedeutung. Durch den Umbau von nicht standortgerechten Nadelbaumbeständen zu Laub- und Mischwäldern hat die Fläche bei der Eiche zugenommen.

Die Esche (*Fraxinus excelsior* [L.]) gehört zur Familie der Oleaceae und es können etwa 35 Arten unterschieden werden (Wagenführ 2000). Mayer (1992) stuft die Esche als Baumart des submontanen Laubmischwaldes ein. Das Ausbreitungsgebiet reicht von Europa bis Mittelrußland, die Esche fehlt aber im nördlichen Skandinavien. Als Arealschwerpunkt wird das nördliche Alpenvorland und der atlantische Westen genannt.

Die Fichte (*Picea abies* [Karst.]) gehört zur Familie der Kieferngewächse (Pinaceae) und es können etwa 50 Arten der Gattung *Picea* zugeordnet werden (Wagenführ 2000). Das natürliche Vorkommen ist durch den anthropogenen Einfluss schwierig abzugrenzen und ist in Mitteleuropa die montane bis subalpine Bergregion, in Nordeuropa sind Tieflagenvorkommen vorhanden (Mayer 1992). Die Fichte ist die wichtigste Wirtschaftsbaumart in Deutschland und Österreich, da sie intensiver als alle anderen Baumarten genutzt wird und die größte Flächenausdehnung aufweist. Die Flächen höherer Altersklassen (größer 80 Jahre) nahmen in den letzten Jahren zu, jedoch haben die Flächen von jüngeren Altersklassen abgenommen. Dieses Verhalten ist auf den Umbau von nicht standortgerechten Fichtenwäldern zurückzuführen (Polley und Kroiher 2006). Dennoch weist die Fichte ein hohes potenzielles Rohholzaufkommen auf.

Die europäische Lärche (*Larix decidua* [Mill.]) gehört ebenfalls zur Familie der Pinaceae. Als Nutzholtlieferant können etwa 7 Arten der Gattung *Larix* verwendet werden (Wagenführ 2000). Das Vorkommen der europäischen Lärche liegt im subalpinen Inneralpengebiet mit Abnahme der Verbreitung gegen die Randalpen und tiefere montane Regionen (Mayer 1992). In Deutschland nimmt die Lärche eine Fläche von rund 300 000 ha ein. Der Holzvorrat der Lärche hat gegenüber der letzten Waldinventur zugenommen, jedoch bei einer Verringerung der Holzbodenfläche (Polley und Kroiher 2006).

In Europa, Nordafrika und Kleinasien sind elf Spezies der Gattung *Abies* beheimatet (Schütt und Lang 1991). Eine Spezies ist die Weißtanne oder Tanne (*Abies alba* [Mill.]) mit dem natürlichen Hauptverbreitungsgebiet im montanen Bergwaldareal Mitteleuropas (Mayer 1992). Bei der Tanne

hat sowohl die Fläche als auch der Vorrat im Vergleich zur letzten Bundeswaldinventur zugenommen und weist eine zweigipfelige Altersstruktur mit dem Schwerpunkt in der ersten (1-20 Jahren) und fünften (81-100 Jahren) Altersklasse auf (Polley und Kroihner 2006).

2.2 Eigenschaften und Verwendung von Hölzern

Die technologischen Eigenschaften werden von den chemischen Bestandteilen, der Morphologie und dem anatomischen Aufbau der einzelnen Holzarten beeinflusst.

2.2.1 Anatomie des Holzes

2.2.1.1 Makroskopische und mikroskopische Struktur

Das Kambium ist verantwortlich für die Bildung des sekundären Dauergewebes und scheidet unter stetiger Vergrößerung seines Umfangs nach innen Holzzellen und nach außen Rindenzellen ab. Da die Holzelemente in größerer Zahl produziert werden, verschiebt sich der Kambiumring immer weiter nach außen und passt sich der Umfangvergrößerung an. Das Holz (Xylem) besteht generell aus verschiedenen Zelltypen (z. B. Gefäße oder Tracheiden), die sich hinsichtlich Art, Größe, Form und Verteilung sowie der axialen oder radialen Ausrichtung unterscheiden. Diese Zellen lassen sich nach ihren Aufgaben in drei Gruppen einteilen, je nachdem ob sie der Festigkeit, Speicherung oder Wasserleitung dienen. Ein Zusammenschluss vieler gleichartiger Zelltypen wird Gewebe genannt. Größe, Form, Anordnung und Aufbau dieses Gewebes ist meist mit dem bloßem Auge oder Lupe in den drei Schnittrichtungen Quer-, Radial- und Tangentialschnitt sichtbar.

Der Querschnitt eines Holzstamms ist für das Verständnis des anatomischen Aufbaues von Holz wichtig. Je nach Holzart lassen sich hierin makroskopisch die Rinde, das Kern- oder Splintholz, die Jahrringe (Zuwachszonen) einschließlich der Holzstrahlen und anderer Gewebekomplexe (Poren, Längsparenchym oder Harzkanäle) sowie die Markröhre unterscheiden. Im Radialschnitt (Spiegelschnitt) erscheinen die angeschnittenen Jahrringe streifenförmig, die aufgeschnittenen Holzstrahlen sind als querverlaufende kleine Bänder erkennbar (teilweise nur unter Vergrößerung). Im Tangentialschnitt (Fladerschnitt) kommen die angeschnittenen Jahrringgrenzen als Parabel zur Geltung, Gefäße werden als feine oder grobe Porenrillen wahrgenommen. Die Holzstrahlen sind als

spindelförmige Striche ersichtlich, jedoch nur selten mit bloßem Auge wahrnehmbar.

Das wesentliche Strukturelement für die Untersuchung des mikroskopischen Aufbaus der Hölzer bilden die einzelnen Zellen. Die einzelnen Holzarten unterscheiden sich hinsichtlich der relativen Häufigkeit und der Anordnung der einzelnen Zellelemente innerhalb des Gewebeverbandes. Nadelhölzer (Gymnospermen) besitzen einen sehr homogenen Aufbau mit einem hohen Tracheidenanteil.

Tabelle 2.2: Kenndaten zur Fasermorphologie der verwendeten Holzarten (Wagenführ 2000)

	Tracheiden ¹ /Fasern ²		Längsparenchym [%]	Holzstrahlen [%]	Gefäße [%]
	[%]	[mm]			
Buche	25,2-57,2	0,60-1,30	3,50-7,00	11,2-21,2	24,6-52,5
Douglasie	≈93,0	2,50-5,60	-	≈7,0	-
Edelkastanie	53,8-59,0	0,60-1,57	-	15,3-18,7	22,4-29,0
Eiche ³	53,5-63,3	1,23-1,74	2,8-8,1	18,1-33,0	3,9-13,0
Esche	50,5-72,2	0,15-1,60	5,7-15,1	13,9-16,0	4,7-21,3
Fichte	94,5-96,5	1,30-4,80	0,0-5,8	4,4-5,5	-
Lärche	89,0-93,0	2,30-4,30	≈0,9	7,0-11,0	-
Tanne	88,0-91,6	3,40-4,60	-	8,4-12,0	-

¹ bei Nadelhölzern

² bei Laubhölzern (zusammengesetzt aus Libriformfasern, Fasertracheiden und vasizentrischen Tracheiden)

³ weitringig

Die restlichen Anteile setzen sich aus Parenchymzellen und Harzkanälen zusammen (Tabelle 2.2). Laubhölzer (Angiospermen) sind entwicklungsgeschichtlich jünger und zeigen bei dem Holzaufbau eine höhere Vielfalt.

Die Buche ist eine Reifholzart, das Splint- und Kernholz der Buche ist normalerweise farblich nicht unterscheidbar (Grosser 2003). Häufig erfolgt die Ausbildung eines fakultativen Farbkerns, der je nach Ausprägung und Erscheinung („normaler“ Rotkern, Spritzkern, Wolkenkern) die Holzqualität mindert. Die Buche gehört zu den zerstreutporigen Laubhölzern und die Jahrringe werden durch porenärmeres, dunkleres Spätholz scharf voneinander abgesetzt. Die Holzstrahlen sind breit mit bloßem Auge sichtbar und können als relativ hoch eingestuft werden, sind an der tangentialen Schnittfläche spindelartig und an der radialen Oberfläche als Bänder ersichtlich (Grosser 2003). Eine Verthyllung tritt nur bei der fakultativen Rotkernbildung auf.

Das Splint- und Kernholz ist bei der Douglasie (Kernholzart) farblich deutlich unterschieden. Die Jahrringe sind sichtbar voneinander abgesetzt. Dünnwandige und weitleumige Frühholztracheiden folgen dickwandigen Spätholztracheiden. Der Übergang vom Früh- zum Spätholz wird im Allgemeinen als schroff bezeichnet. Die Holzstrahlen sind einreihig, wobei sie nur vereinzelt stellenweise auf zwei Reihen erweitert sein können. Die vertikalen Harzkanäle sind einzeln oder in Paaren, häufiger auch zu kleinen Gruppen aneinandergereiht (Grosser 2003).

Die Edelkastanie ist eine Kernholzart und weist häufig einen schmalen Splint auf (Grosser 2003). Edelkastanie gehört zu den ringporigen Hölzern. Die Poren sind mit dem bloßem Auge sichtbar und die Gefäße des Frühholzes bilden einen breiten Porenkreis an den Jahrringgrenzen. Eine Verthyllung der Frühholzporen ist meist festzustellen. Die Holzstrahlen sind meist einreihig und erst unter der Lupe erkennbar.

Sowohl die Stieleiche als auch die Traubeneiche sind Kernholzarten und eine Unterscheidung beider Hölzer durch anatomische Merkmale ist nicht möglich (Grosser 2003). Bei Eichenholz bilden sich manchmal Mondringe, helle, auf dem Querschnitt ringförmig erscheinende Zonen im Kernholzbereich. Nach Verletzungen kann durch Luft das Parenchym im Splintbereich geschädigt werden, eine spätere Kernbildung wird nur unvollständig ausgeführt, farbliche Veränderungen sind die Folgen. Eiche gehört zu den ringporigen Hölzern. Die Poren sind mit dem bloßem Auge sichtbar und die Frühholzgefäße bilden einen ein- bis mehrreihigen Porenkreis an den Jahrringgrenzen. Dabei sind die Frühholzporen stets stark verthyllt (Grosser 2003). Die Holzstrahlen sind oft sehr breit und hoch, dadurch ohne Lupe sichtbar.

Bei Esche ist Splint- und Kernholz teilweise gleichfarbig (Kernreifholzbaum) (Grosser und Zimmer 2000). Eine fakultative Kernausbildung mit dunklem Kern ist möglich und kann als „Oliv-Kern“ oder „Braun-Kern“ bezeichnet werden. Die Esche besitzt wie die Eiche eine ringporige Anordnung der Frühholzgefäße an den Jahrringgrenzen, diese sind mit freiem Auge sichtbar (Grosser 2003). Die homogenen Holzstrahlen sind meist mehrreihig, aber relativ schmal und kaum erkennbar. Eine Verthyllung tritt häufig ein.

Bei Fichte ist der Splint- und Kernholzbereich ohne farbliche Unterscheidung (Reifholzbaum). Die Jahrringe sind deutlich erkennbar. Die Übergänge innerhalb der Jahrringe von Früh- zum Spätholz

sind gleitend (Grosser 2003). Die Holzstrahlen sind einreihig, wobei harzführende Strahlen im Mittelteil auch mehrreihig sein können. Vertikale Harzgänge werden zumeist im Spätholz ausgebildet.

Splint- und Kernholz ist bei der Lärche farblich unterschiedlich. Die Jahrringgrenze ist sehr deutlich. Das Spätholz ist innerhalb der Jahrringe scharf abgesetzt (Grosser 2003). Die Holzstrahlen sind einreihig, jedoch weisen harzgangführende Strahlen um den Harzgang eine mehrreihige Struktur auf. Die vertikalen Harzkanäle befinden sich vornehmlich im Spätholzbereich.

Splint- und Kernholz weist bei Tanne keine farblichen Unterschiede auf. Häufig tritt bei Tannen eine Nasskernbildung auf, eine durch Bakterien hervorgerufene Begleiterscheinung im Reifholzbereich bei gesunden Tannen. Der pathologische Nasskern tritt bei absterbenden Tannen auf und beeinträchtigt das funktionstüchtige Splintholz. Der Nasskern weist einen deutlich höheren Feuchtigkeitsgehalt gegenüber den umliegenden Bereichen auf. Die Jahrringe sind deutlich voneinander abgesetzt. Die Holzstrahlen sind einreihig und makroskopisch kaum erkennbar. Harzkanäle sind normalerweise nicht vorhanden, auftretende Harzgänge sind auf Wundgewebe infolge einer Verletzung des stehenden Stammes zurückzuführen (Grosser 2003).

2.2.1.2 Ultrastruktur des Holzes

Die Zellwände der einzelnen Holzzellen sind aus verschiedenen Zellwandschichten zusammengesetzt. Der Aufbau des Zellverbandes, eingeteilt in Lumen, Mittellamelle (ML), Primärwand (P), Sekundärwand 1 und 2 (S1, S2), kann durch elektronenmikroskopische Analysen unterschieden werden (Abbildung 2.1). Die einzelnen Bauelemente weisen unterschiedliche chemische Zusammensetzungen und Strukturen auf.

Die Mittellamelle setzt sich aus amorphen Substanzen wie Pektin und Lignin zusammen (Bosshard 1984) und verbindet aneinanderstoßendes Zellgewebe miteinander. Der Übergang von der Mittellamelle zu den benachbarten Zellwandschichten ist nicht eindeutig trennbar (Parham und Gray 1984). Die äußerste Zellwandschicht (Primärwand) besteht neben Cellulose, Polyosen auch aus Lignin. Die Sekundärwand besteht vorwiegend aus Cellulose und Lignin. Die Cellulose-Fibrillen liegen meist als Makrofibrillen mit paralleler Anordnung vor. Weiters kann die Sekundärwand in die S1- und S2-Schichten eingeteilt werden, die sich in ihrer Dicke und der Fibrillenorientierung unterscheiden. Eine S3-Schicht kann bei Parenchymzellen festgestellt werden, jedoch ist sie von der

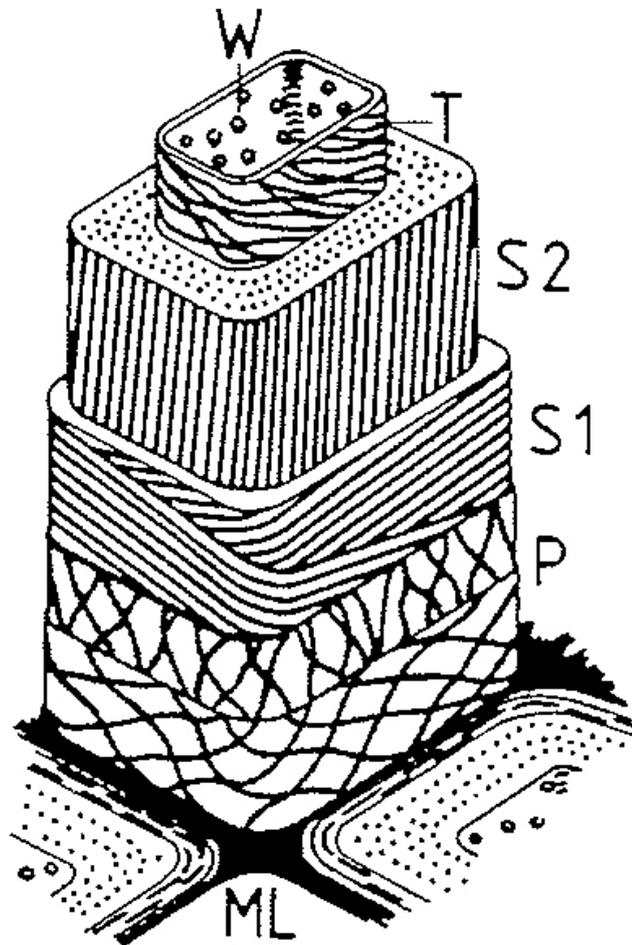


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Zellwandaufbaus (Fengel und Wegener 2003) ML: Mittellamelle, P: Primärwand, S1: Sekundärwand 1, S2: Sekundärwand 2, T: Tertiärwand, W: Warzenschicht

Tertiärwand zu unterscheiden, da die Fibrillen der Tertiärwand keine strikte parallele Anordnung wie die anderen Sekundärwände aufweisen (Fengel und Wegener 2003).

Interfibrilläre Hohlräume sind mit amorphem Lignin ausgefüllt. Die Tertiärwand schließt die Zellwandschicht zum Zellumen ab und besteht aus einem großen Anteil nicht ausgerichteter Komponenten, um der Zellwand eine möglichst glatte Oberfläche zu geben (Parham und Gray 1984).

2.2.2 Chemischer Aufbau

Holz ist ein Verbundrohstoff und besteht aus einer Reihe von Polymeren. Generell können die Massenprozentanteile der Hauptbestandteile wie folgt aufgeteilt werden:

45-50 % der Holzmasse ist Cellulose und somit ist die Cellulose der wichtigste Bestandteil der Holzmatrix. Lignin hat einen Massenanteil von 25-30 %, die chemische Zusammensetzung ist bei Laub- und Nadelholz unterschiedlich. Der prozentuelle Anteil der Polyosen wird mit 15-20 % angegeben. Holz enthält in geringen Mengen noch weitere vielfältige Komponenten. Die sogenannten Extraktstoffe wie Terpene, Wachse, Fette, Mineralstoffe sowie Gerb- und Farbstoffe.

Ein Vergleich der chemischen Zusammensetzung der in den Untersuchungen verwendeten Holzarten ist in der Tabelle 2.3 dargestellt. Der Anteil der Holocellulose setzt sich zusammen aus Cellulose und den alkalisch leicht extrahierbaren Polyosen.

Tabelle 2.3: Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Holzarten im Vergleich (Fengel und Grosser 1975, Wagenführ 2000)

	Holocellulose [%]	Cellulose [%]	Polyosen [%]	Lignin [%]	Extraktgehalt		
					Alkohol-Benzol [%]	Heißwasser [%]	Asche [%]
Buche	- ¹	53,6	-	22,5	1,2	-	1,2
Douglasie	67,0	50,4	-	27,2	4,4	6,5	0,2
Edelkastanie	-	41,9	-	34,7	4,7	-	0,4
Eiche	77,0	37,6	28,6	24,5	4,4	-	0,3
Esche	-	44,2-46,8	-	21,1-30,4	-	-	0,5-0,6
Fichte	80,9	46,0	15,3	27,3	2,0	2,0	0,3-0,8
Lärche	-	65,4-68,8	-	24,8 - 30,0	1,4-3,1	4,6-12,6	0,2-0,3
Tanne	-	40,6	22,3	29,2	2,8	-	1,1

¹ nicht erfasst

Cellulose ist von der Menge her betrachtet sowie von der Verbreitung das häufigste und wichtigste Biopolymer in der Natur. Dabei handelt es sich um ein lineares Polysaccharid, genauer ein isotaktisches β -(1-4)-Polyacetal von Cellobiose (4-O- β -D-Glucopyranosyl-D-Glucose), die ihrerseits aus zwei Molekülen Glucose besteht. Die lineare Versteifung des Makromoleküls ist auf intramolekulare Wasserstoff-Brückenbindungen zwischen den 3-Hydroxyl-Gruppen und den Ringsauerstoffatomen benachbarter Glucose-Ringe zurückzuführen. Eine Glucose-Einheit besitzt eine Länge von 1,03nm (Fengel und Wegener 2003). Die parallele Zusammenlagerung von 60 bis 70 Celluloseket-

ten führt zu den für Pflanzen charakteristischen Mikrofibrillen mit Durchmessern von ca. 10-20nm. Die Mikrofibrillen lagern sich ihrerseits zu Makrofibrillen zusammen, die dem Holz seine hohe Zugfestigkeit verleihen.

Polyosen sind im Gegensatz zur Cellulose verzweigte Heteropolysaccharide, die aus unterschiedlichen Zuckereinheiten aufgebaut sind. Als Monomere finden sich Hexosen (etwa Galactose, Glucose, Mannose) und Pentosen (z. B. Arabinose, Xylose). Die Xylane sind die häufigsten Polyosen bei Laubhölzern (Fengel und Wegener 2003) und bestehen aus einem Grundgerüst von β -(1-4) glycosidisch verknüpften Xyloseketten. Bei Nadelhölzern gehören die Mannane zum Hauptanteil der Polyosen (Fengel und Wegener 2003). Der Polymerisationsgrad der Polyosen ist niedriger als bei Cellulose. Die Polyosen sind im Gegensatz zur Cellulose verzweigt und lagern sich in die Fibrillen ein, dienen so als stützendes Material. Bosshard (1984) beschreibt die Funktion von Polyosen als Reservesubstanzen, die für den Stoffwechsel der Bäume wieder mobilisiert werden können.

Lignin ist nach der Cellulose der mengenmäßig wichtigste Rohstoff im Pflanzenreich. Es besteht aus vernetzten Phenylpropan-Einheiten. Der Phenylring ist mit Methoxygruppen und die Propan-Einheiten mit Hydroxylgruppen substituiert (Fengel und Wegener 2003). Bei Nadelhölzern ist hauptsächlich der Guajacyl-Typ zu finden. Laubhölzer weisen außerdem den Syringyl- und Cumaryl-Typ auf. An der aromatischen Struktur des Lignins befinden sich hauptsächlich vier verschiedene funktionelle Gruppen, dabei variiert die relative Anzahl der funktionellen Gruppen (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Funktionelle Gruppen im Lignin [Anzahl pro 100 Phenyl-Einheiten] (Sjöström 1993)

Gruppen	Nadelholzlignin	Laubholzlignin
Methoxyl	92-97	139-158
Phenolische Hydroxyl	15-30	10-15
Benzyliche Hydroxyl	30-40	40-50
Carbonyl	10-15	

Laubholz enthält mehr Methoxyl-Gruppen als Nadelholz, dieser Umstand ist auf den höheren Anteil von Sinapylalkohol zurückzuführen. Im Lignin können mindestens zehn Arten von Bindungen vorkommen (Nimz 1974). Die Phenylpropaneinheiten werden hauptsächlich durch Etherbindungen oder durch kovalente Kohlenstoffdoppelbindungen zusammengehalten. Lignin wird zwischen der Matrix aus Cellulose und Polyosen eingelagert, damit wird die Gewebematrix wesentlich versteift (Bosshard 1984). Laut Fengel und Wegener (2003) entstehen chemische Bindungen zwischen den

Polyosen und dem Lignin. Das Lignin kommt hauptsächlich in der Mittellamelle und in der Sekundärwand vor.

Unter der Bezeichnung Extraktstoffe wird eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer Verbindungen zusammengefasst, die sich weitgehend mit polaren oder unpolaren Lösemitteln aus dem Holz extrahieren lassen (Sjöström 1993; Fengel und Wegener 2003). Sie sind vor allem in den Harzkanälen und den Längsparenchymzellen, aber auch in der Mittellamelle, den Interzellularen und den Zellwänden vorhanden. In sehr geringen Konzentrationen haben sie häufig eine große Wirkung, beispielsweise für die Farbe und den Geruch einer Holzart. Unter dem Begriff „Harze“ wird ein Teil der Extraktstoffe zusammengefasst und ist wiederum ein Sammelbegriff für viele chemische Verbindungen, wie Terpene, Flavonoide etc.

2.2.3 Holztechnologische Eigenschaften

Die technologischen Holzeigenschaften spielen für die unterschiedlichen Einsatzbereiche eine wichtige Rolle und müssen bei der Verwendung berücksichtigt werden. In Tabelle 2.5 ist eine Auswahl für die mechanisch-technologischen Kennwerte der verwendeten Holzarten aufgelistet.

Tabelle 2.5: Physikalische und mechanisch-technologische Kennwerte der verwendeten Holzarten (Grosser und Zimmer 2000)

	Rohdichte [g/cm ³]	Differenzielles Schwind- und Quellmaß		Biegefestigkeit σ_{bB} [N/mm ²]	Druckfestigkeit $\sigma_{ }$ [N/mm ²]	Brinellhärte $H_{ }$ [N/mm ²]
		rad [%/%]	tan [%/%]			
Buche	0,69	0,20	0,41	120,0	60,0	72,0
Douglasie	0,55	0,15	0,27	72,0	43,0	50,0
Edelkastanie	0,60	0,14	0,23	35,5	45,5	35,5
Eiche	0,69	0,16	0,36	94,0	55,0	66,0
Esche	0,69	0,21	0,38	105,0	50,0	65,0
Fichte	0,47	0,19	0,39	66,0	43,0	32,0
Lärche	0,59	0,14	0,30	96,0	47,0	53,0
Tanne	0,45	0,19	0,36	62,0	40,0	30,0

Alle acht verwendeten Holzarten werden für Innen- sowie Außenanwendungen eingesetzt (Grosser und Zimmer 2000). Dabei sind die Anwendungen nicht nur auf die gestalterischen Verwendungen

beschränkt, vor allem Douglasie, Eiche, Fichte, Lärche und Tanne werden für die konstruktiven Elemente verwendet. Eichenholz ist zwar gut für Anwendungen im Hochbau geeignet, jedoch sind die erforderlichen Mengen und Qualitäten in der Regel nur begrenzt verfügbar. Bei Douglasie und Lärche sind die mittleren Festigkeiten höher als bei Fichte und Tanne (Sauter 1992; Glos et al. 2006). Sie können mit den Werten der mittleren Biegefestigkeit der Eiche verglichen werden (Grosser und Zimmer 2000).

Buche wird im Innenbereich wegen seiner hellen Farbe für dekorativen Eigenschaften, seiner leichten Bearbeitbarkeit und für stark beanspruchte Gebrauchsmöbel eingesetzt (Grosser und Zimmer 2000). Es kann leicht gedämpft werden, was zu einer rötlichen Farbe führt. Durch eine Wärme- und Wasserdampfbehandlung ist ein leichtes Biegen des Buchenholzes möglich, bei Formgebung während des Abkühlprozesses bleibt eine dauerhafte Verformung. Neue Einsatzmöglichkeiten von „rotkerniger“ Buche (fakultativer Farbkern) wurden durch Forschungsprojekte aufgezeigt (Seeling 2007).

Europäisches Douglasienholz wird im Innenbereich vor allem für Wand- und Deckenbekleidungen eingesetzt (Grosser und Zimmer 2000). Bei einer Oberflächenbehandlung des Holzes ist der Einsatz von Wachsen und Lasuren gegenüber den Polyesterharzen vorzuziehen (Wagenführ 2000).

Im Innenbereich wird Eichenholz wegen seiner dunklen Farbe sehr gerne und häufig für dekorative Zwecke, wie Möbel, Türen und Deckenbekleidungen, eingesetzt. Aufgrund der holztechnologischen Eigenschaften wird Eichenholz für hoch beanspruchte Einsatzgebiete (z. B. Fußböden) verwendet. Die Fichte wird seit je her für viele Anwendungen des täglichen Lebens verwendet. Diese hohe Gebrauchstauglichkeit kann auf die große Verfügbarkeit und den Ruf des „Brotbaumes“ der Forstwirtschaft sowie die leichte und einfache Bearbeitbarkeit (etwa beim Sägen, Hobeln und Verleimen) gegenüber anderen Holzarten zurückgeführt werden. Deshalb wird Fichtenholz vielseitig im Innenbereich verwendet.

Wegen des begrenzten Mengenanfalls ist das Holz der Edelkastanie in Deutschland und Österreich wenig bekannt. Das Kernholz ist der Farbe des Eichenholzes sehr ähnlich und bietet sich für Füllungen im Möbelbau sowie im Innenausbau für Tafelungen und Parkett an (Grosser und Zimmer 2000).

Esche weist einen hellen Farbton auf und wird häufig für optische Anwendungen im Innenbereich eingesetzt. Besonders im Möbel- und Treppenbau sowie bei Fussböden findet Eschenholz in Form von Massivholz und Furnieren Anwendungen. Neben der hellen weißlich bis gelblichen Färbung existiert noch der lichtbraune bis schokoladenbraune fakultative Farbkern, der zur dekorativen Gestaltung eingesetzt wird (Grosser und Zimmer 2000).

Neben der Eiche als Laubholz ist die Lärche das schwerste und zugleich härteste einheimische Nadelholz (Grosser und Zimmer 2000). Im Innenbereich kann es problemlos für alle Anwendungen (z.B. Fußböden, Treppen, Möbel, Wand- und Deckenbekleidungen) eingesetzt werden.

Tannenholz weist ähnlich gute mechanische Eigenschaften wie die Fichte auf, jedoch besitzt die Tanne keine Harzkanäle und die Verarbeitung (etwa Holz Trocknung) muß auf das Tannenholz zugeschnitten sein. Häufig wird beim Rundholzverkauf ein Mischsortiment von Fichten- und Tannenholz angeboten und die Tanne nicht als eigenständiges Produkt gesehen (Anonymus 1995). Dadurch wird bis heute das Verwendungspotential der Tanne unterschätzt und nicht ausgenutzt.

2.3 Einflussfaktoren bei der Holzverwendung

Das System von Einwirkungen und Auswirkungen auf das Holz kann grundsätzlich in drei Säulen aufgeteilt werden (Abbildung 2.2). Die erste Säule stellt den Einfluss des Holzes und des Produktdesign dar. Die einzelnen Umwelteinflüsse und deren Auswirkungen auf die Produkteigenschaften können zwei weiteren Säulen zugeordnet werden.

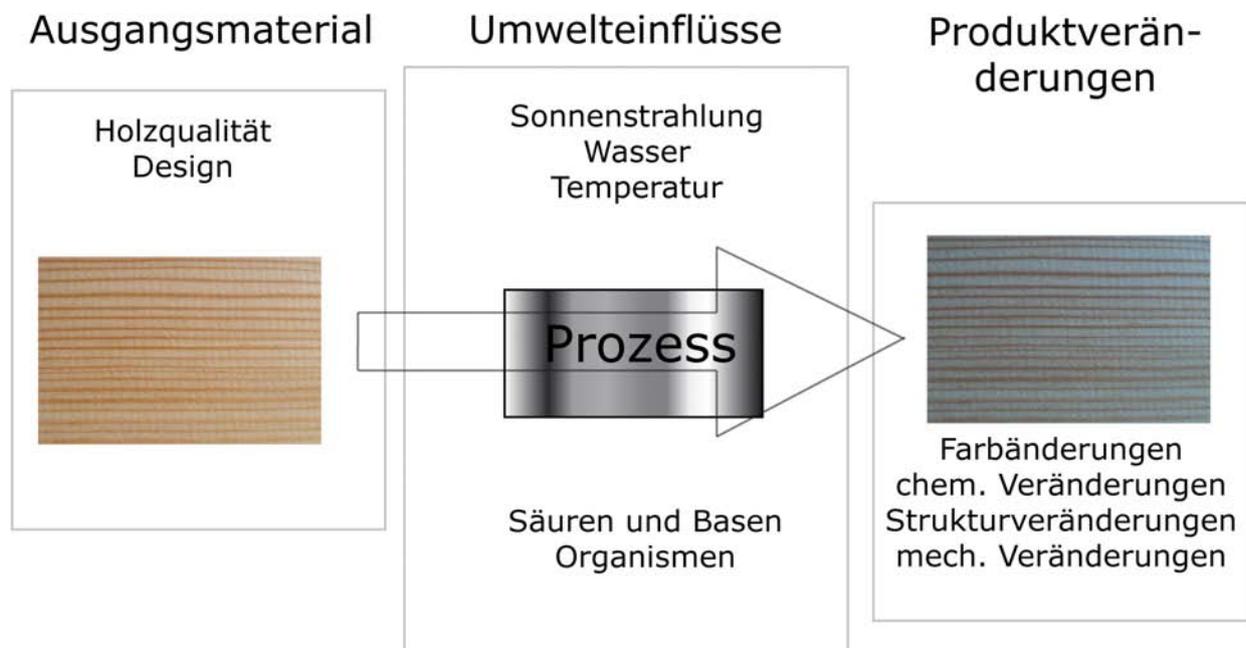


Abbildung 2.2: Überblick der möglichen Ein- und Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf das Holz in seiner Verwendung in Produkten über die Zeit

2.3.1 Holzqualität und Design

Die Holzqualität ist prinzipiell eine willkürliche Klassifikation bezogen auf die unterschiedlichen Beobachtungsstandpunkte wie Holzchemie, -struktur und -dimension (Bowyer et al. 2003). Für die jeweilige Anwendung ist die Qualität nach den entsprechenden Anforderungen zu definieren. Dabei können Richtwerte und Normen Anhaltspunkte geben. Bei Holzvergütungen werden Holzeigenschaften gezielt verändert, dadurch steigt die Holzqualität, jedoch sind dabei Grenzen gesetzt, da nicht alle Eigenschaften durch die Modifikation verbessert werden (z. B. Festigkeit).

2.3.2 Auswirkungen der Temperatur unter 300°C und darüber

Der Einfluss der Temperatur auf den Holzabbau unter 100°C ist vernachlässigbar, da die Auswirkungen nicht messbar sind, beziehungsweise die Veränderungen so langsam ablaufen, dass sie für den Holzabbau nicht relevant sind (Futó 1976). Ab einer Temperatur über 150°C können erste Abbaureaktionen der Holzbestandteile festgestellt werden und nehmen mit steigender Temperatur zu (Sandermann und Augustin 1963a; Fengel und Przyklenk 1970). Shafizadeh (1984) unterteilt die Auswirkungen der Temperatur auf Holz in 2 Phasen und nennt die Temperatur von 300°C als Grenze. Unterhalb von 300°C dominiert die Verdrängung von Wasser, die Reduktion des Polymergrades, die Bildung von freien Radikalen sowie von Carbonyl- und Carboxylgruppen, dabei wird Kohlenmonoxid und Kohlendioxid freigesetzt. Ab einer Temperatur von 300°C schließt der Zersetzungsmechanismus die Spaltung von Molekülen ein, die Zuckerabbauprodukte (z. B. Levoglucosan) und flüchtige niedermolekulare Abbauprodukte liefert. Oberhalb von 450°C existieren keine flüchtigen Produkte mehr, der weitere Massenabbau ist auf den Abbau der verbleibenden Kohle zurückzuführen.

Cellulose

Ein Herabsetzen des Polymerisationsgrades von Cellulose bei einer Temperatur von 150-190°C konnte durch Viskositätsmessungen nachgewiesen werden (Shafizadeh 1984). Bei längerer Temperatureinwirkung wurden weitere Cellulosebindungen zerstört und ein linearer Zusammenhang zwischen der Depolymerisation und der Behandlungszeit festgestellt. Sandermann und Augustin (1964) zeigten einen Abbau der Cellulose von rund 3 % bis zu einer Temperatur von 257 °C.

Die Abbaureaktionen von Polysacchariden (Cellulose und Polyosen) beginnen mit einer Hydrolyse. Es erfolgt eine Aufspaltung der Etherbindungen zwischen den Molekülen. Lävoglucosan gilt als primäres Spaltprodukt bei der thermischen Zersetzung der Cellulose (Sandermann und Augustin 1964).

Polyosen

Die Abbaumechanismen der Polyosen gleichen dem thermischen Abbau von Cellulose (Sandermann und Augustin 1963b). Jedoch weisen die Polyosen eine geringere thermische Beständigkeit gegenüber der Cellulose auf. Die amorphe Struktur der Polyosen mit den unterschiedlichen monomeren Gruppen sind für den empfindlichen thermischen Abbau verantwortlich (Windeisen et al. 2007). Unter einer Sauerstoff-Atmosphäre werden die Polyosen bei einer Temperatur um 200°C abgebaut (Sandermann und Augustin 1963b). Fengel (1966b) stellte erste Veränderungen des Gehaltes der Polyosen bei einer Temperatur von 180 °C fest. Durch papierchromatographische Untersuchungen wurde ein Anstieg des Glucosegehaltes und eine Abnahme der Pentosen bestimmt, was auf die Hydrolyse der Cellulose und Polyosen zurückgeführt wurde.

Lignin

Fengel und Przyklenk (1970) untersuchten den Einfluss der Wärmebehandlung auf das Lignin in Fichtenholz und folgerten die Veränderung am Lignin bei rund 150°C, da durch Methanol-Benzol-Extraktionen eine Zunahme von Vanillin, einem Ligninabbauprodukt, festgestellt werden konnte. Die Abbaureaktionen des Lignins basieren auf der Spaltung der Lignin-Polysaccharid-Bindung und einer Depolymerisierung der Moleküle. Eine Spaltung findet im Bereich der α - und β -Aryl-Ether-Bindungen statt. Die Methoxygruppen werden als thermisch stabil bezeichnet, zumal erst bei 180 bis 200 °C teilweise diese Gruppen vom Lignin abgespalten werden.

Farbänderung

Schneider (1966) untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Wärmebehandlungen im Bereich bis 200°C auf den spektralen Remissionsgrad von Buchen-, Eichen- und Kiefernholz. Ab einer Tempera-

tur von über 100°C wurden Veränderungen erkennbar und je höher die Temperatur gewählt wurde, desto niedriger wurden die Werte der Remissionsgrade. Bei den Kiefernproben konnte keine Abhängigkeit der Wärmebehandlung festgestellt werden. Buchen- und Eichenholz lassen einen zeitlichen Einfluss bei der Behandlung erkennen. Bei längerer Behandlung nahmen die Werte der Remissionsgrade über den ganzen Wellenlängenbereich ab. Schneider (1973) stellte ebenfalls eine Abnahme der Remissionsgrade bei der Holz Trocknung im Bereich 110 bis 180°C fest. Bourgois et al. (1991) zeigten bei ihren Untersuchungen über thermisch modifiziertes Kiefernholz eine Veränderung des Farbtones und eine Zunahme der Sättigung im Bereich von 100 bis 300°C und folgerten, dass die Farbänderung durch den Abbau von Lignin und Polyosen zustande kommt.

2.3.3 Auswirkungen der Lichtstrahlung

2.3.3.1 Sichtbare strukturelle Veränderungen

Lichtstrahlung ist ein Teil der elektromagnetischen Strahlung und kann in einen ultravioletten (UV), einen sichtbaren (VIS) und den infraroten (IR) Bereich unterteilt werden.

Mikroskopische Untersuchungen zeigen eine Veränderung der Holzstruktur nach einer Lichtbestrahlung. Abhängig von der Bestrahlungszeit, -intensität oder anderen Einflüssen (Temperatur, Feuchtigkeit) wird der Abbau beeinflusst (Borgin et al. 1975). Futó (1974) analysierte den photochemischen Abbau des Holzes im UV-Bereich und stellte markante Strukturunterschiede fest. Er zeigte, dass Frühholz wesentlich stärker als Spätholz angegriffen wird und bei intensiver Bestrahlung das Holz in seine einzelnen Zellen zerfällt. Oberhalb von 320 nm Wellenlänge der Strahlung wurde keine Zersetzung des Holzes festgestellt. Durch Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop konnte bei einer 5 tägigen UV-Bestrahlung von Kiefernholz (*Pinus resinosa*) eine Zerlegung der Mittellamelle in den Spätholzzellen ermittelt werden, wobei eine unterschiedliche Spaltung in radialer und tangentialer Richtung beobachtet wurde (Kuo und Hu 1991). Diese Beobachtung wurde auf die dickeren Zellwände in radialer Richtung und auf den höheren Ligninanteil zurückgeführt. Im gleichen Zeitraum wurden Teile der S3-Schicht angegriffen. Nach 30 Tagen war die S3-Schicht nicht mehr vorhanden sowie die Struktur der S2-Schicht angegriffen. Evans et al. (2000) veröffentlichten vergleichbare Ergebnisse über den Abbau der Mittellamelle bei Kiefernholz nach einer 35 tägigen natürlichen Bewitterung. Die Rissanzahl kleinflächiger Kiefernholzproben (*Pinus contorta*) war bei der Bestrahlung durch gefiltertes Sonnenlicht geringer (Evans et al. 2008). Dabei wurde haupt-

sächlich die UV-Strahlung für die Rissbildung verantwortlich gemacht. Die Rissbildung entsteht im Bereich der Holzstrahlen und pflanzt sich in der Schicht zwischen der Mittellamelle und der angrenzenden Primärwand fort, dies zeigten Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop.

2.3.3.2 Chemische Veränderungen

Holzproben und ligninhaltiges Material, welches mit UV-Licht bestrahlt wird, weisen eine Veränderung aller Holzbestandteile auf. Dieses Verhalten kann über die starke UV-Absorption und das hohe Oxidationspotential des Lignins erklärt werden. Im Wellenlängenbereich zwischen 200 und 450 nm weist Lignin den größten Absorptionsanteil auf (Hon und Shiraishi 1991). Nach Norrström (1969) absorbieren Lignin 80-95%, Kohlenhydrate 5-20% und Extraktstoffe etwa 2% der einfallenden UV-Strahlung. Im Bereich des sichtbaren Lichtes sind vergleichbare Absorptionswerte der Holzbestandteile vorhanden (Hartler und Norrström 1969). Beeinflusst wird die Absorption vom Anteil und der Struktur der chromophoren Gruppen im Molekül, die sowohl im Lignin sowie in den Extraktstoffen vorhanden sind (Norrström 1969; Polcin 1793).

Das UV-Licht kann bis etwa 75 μm in das Holz eindringen und der sichtbare Anteil der Sonnenstrahlung kann bis zu einer Tiefe von ca. 200 μm reichen (Hon und Ifju 1978). Dies wurde durch Messungen über die Entstehung freier Radikale mit Elektronen-Spin-Resonanz (ESR) ermittelt. Jedoch können die chemischen Veränderungen an der Oberfläche bei anhaltender Bestrahlung weiter in die Tiefe des Materials fortschreiten (Kleinert 1970; Horn et al. 1994; Kataoka und Kiguchi 2001). Aufschluss über den Verlauf der Auswirkungen auf Holz kann die Änderung des Gehaltes an Kohlenstoffdoppelbindungen und Methoxylgruppen geben (Kleinert 1970; Hon und Feist 1986; Faix und Németh 1988). IR-Untersuchungen zeigen eine Verringerung der Absorption von Banden der Methoxylgruppe bei etwa 1270 cm^{-1} und der aromatischen Ringverbindungen bei rund 1510 cm^{-1} von unterschiedlichen Laub- und Nadelhölzern nach einer UV-Bestrahlung (Anderson et al. 1991a;b; Tolvaj und Faix 1995; Košíková und Tolvaj 1998). Daneben steigt die Absorptionsintensität der Carbonylgruppen bei Nadelholz und Laubholz im Wellenzahlenbereich von 1720 bis 1740 cm^{-1} bei einer UV-Bestrahlung (Anderson et al. 1991a; Colom et al. 2003; Cui et al. 2004; Pandey 2005b). Bei Bestrahlung und Wassereinwirkung verringert sich die Absorption der Carbonylgruppen von der anfänglichen Steigerung, was auf einen Auswaschungsprozess der carbonylhaltigen Abbauprodukte zurückzuführen ist (Anderson et al. 1991a). Bei Laubhölzern wurde keine strahlungsverursachte Steigerung der Absorption der Carbonylgruppen festgestellt (Anderson et al.

1991b). Borgin et al. (1975) bestimmten einen stärkeren Abbau der Syringylgruppe des Laubholzlignins als bei der Guajacylgruppe des Nadelholzlignins bei Untersuchungen von 900 bis 4400 Jahren alten Holzproben.

2.3.3.3 Bildung freier Radikale

Freie Radikale können mit der Elektronen-Spin-Resonanz (ESR) bestimmt werden. Im nativen Holz können in den Extraktstoffen des Holzes freie Radikale vorhanden sein (Kleinert 1970), Cellulose, Lignin und Polyosen weisen keine freien Radikale auf (Hon 1976b). Bei einer Bestrahlung mit Licht können freie Radikale entstehen (z. B. Abbildung 2.3) und sind als erstes Produkt der photochemischen Reaktionen für den Abbauprozess verantwortlich (Kringstad und Lin 1970; Li und Ragauskas 2000).

Kleinert (1964) und Hon (1976a;b) untersuchten die Bildung freier Radikale von Cellulose bei einer UV-Bestrahlung mittels ESR und zeigten, dass die Radikalbildung die Primärreaktion für die Polymerkettenaufspaltung von bestrahlter Cellulose ist und von der Anwesenheit von Sauerstoff unabhängig ist. Peroxidische Radikale bildeten sich jedoch nur unter Sauerstoffatmosphäre. Cellulose mit wenig kristallinen Anteilen weist eine höhere Entstehung freier Radikale auf (Hon 1976a). Eine Radikalbildung bei Cellulose wurde nur bei einer UV-Strahlung unter 340 nm festgestellt (Andrady et al. 1998). Dabei werden im Frühholzbereich schneller Radikale gebildet, bewirkt durch den höheren Ligninanteil (Hon und Feist 1981). Als weiterer Faktor zur Bildung der Radikale wurde der Feuchtegehalt ermittelt, bei steigender Holzfeuchte von über 6,3% nimmt auch die Entstehung freier Radikale zu (Hon und Feist 1981).

2.3.3.4 Abbaumechanismen

Die Lichtstrahlung besteht aus Photonen und transportiert Energie, dabei nimmt der Energiegehalt der Strahlung bei Abnahme der Wellenlänge zu. Durch die Lichtabsorption der einzelnen Holzbestandteile wird Energie durch die Moleküle aufgenommen und führt zu einer photochemischen Reaktion. Polymerkettenaufspaltungen der chemischen Struktur der Holzbestandteile sind die Folge.

Bestrahlung mit Wellenlängen unter 300 nm führen bei Cellulose zu einer Abspaltung von niedermolekularen Kohlenhydraten wie Glucose und Oligosacchariden (Desai und Shields 1969). Die

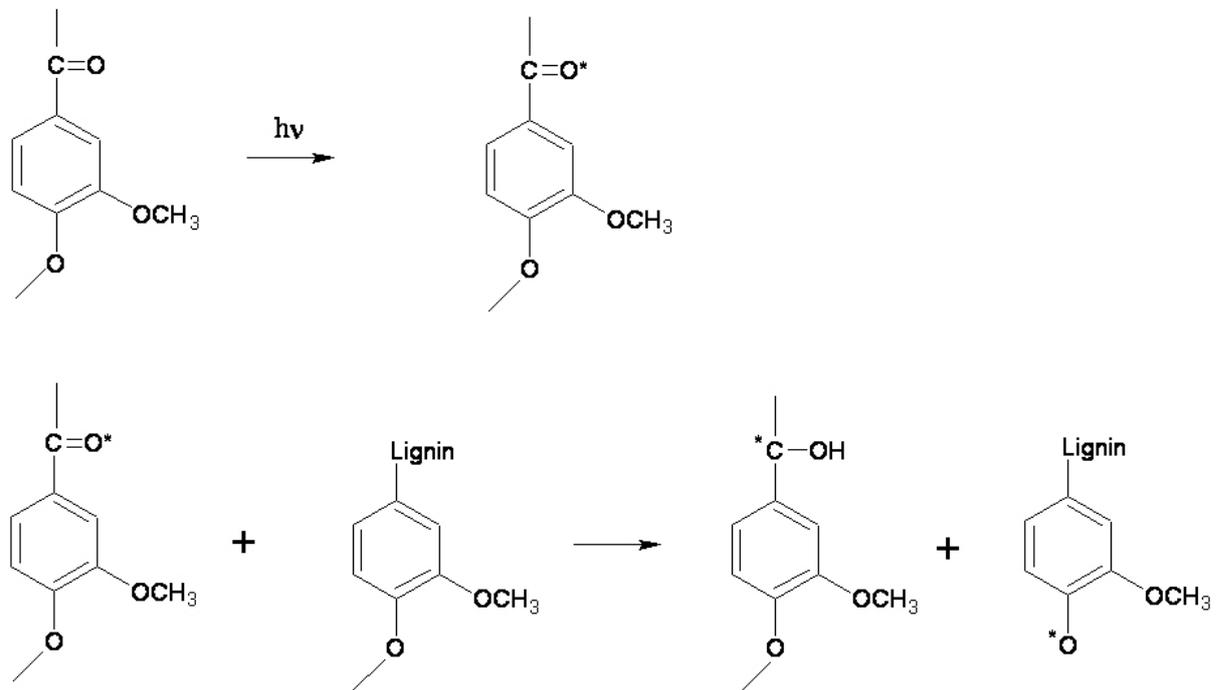


Abbildung 2.3: Phenoxy- und Ketyl-Radikalbildung durch angeregte Carbonylgruppe nach Li und Ragauskas (2000)

Kettenspaltung erfolgt zwischen C_1 - und C_4 -Bindungen der Celluloseeinheit (Hon 1976b). Entstandene Radikale wurden mittels Auswertung von ESR-Signalen bestimmt. Bei Faserstoffen mit einem Restanteil Lignin erfolgte die Radikalbildung hauptsächlich im Lignin (Selli et al. 1998). Eine höhere Ligninkonzentration im Frühholzbereich führt zu einer vermehrten Radikalbildung bei einer UV-Bestrahlung (Hon und Feist 1981).

2.3.3.5 Vergilbungsreaktionen

Die farblichen Veränderungsprodukte werden vom Lignin und von Ligninderivaten gebildet und können Strukturen von Chinonen, Chinonmethiden und Stilbenen aufweisen (Morgan und Orsler 1968; Polcin 1793).

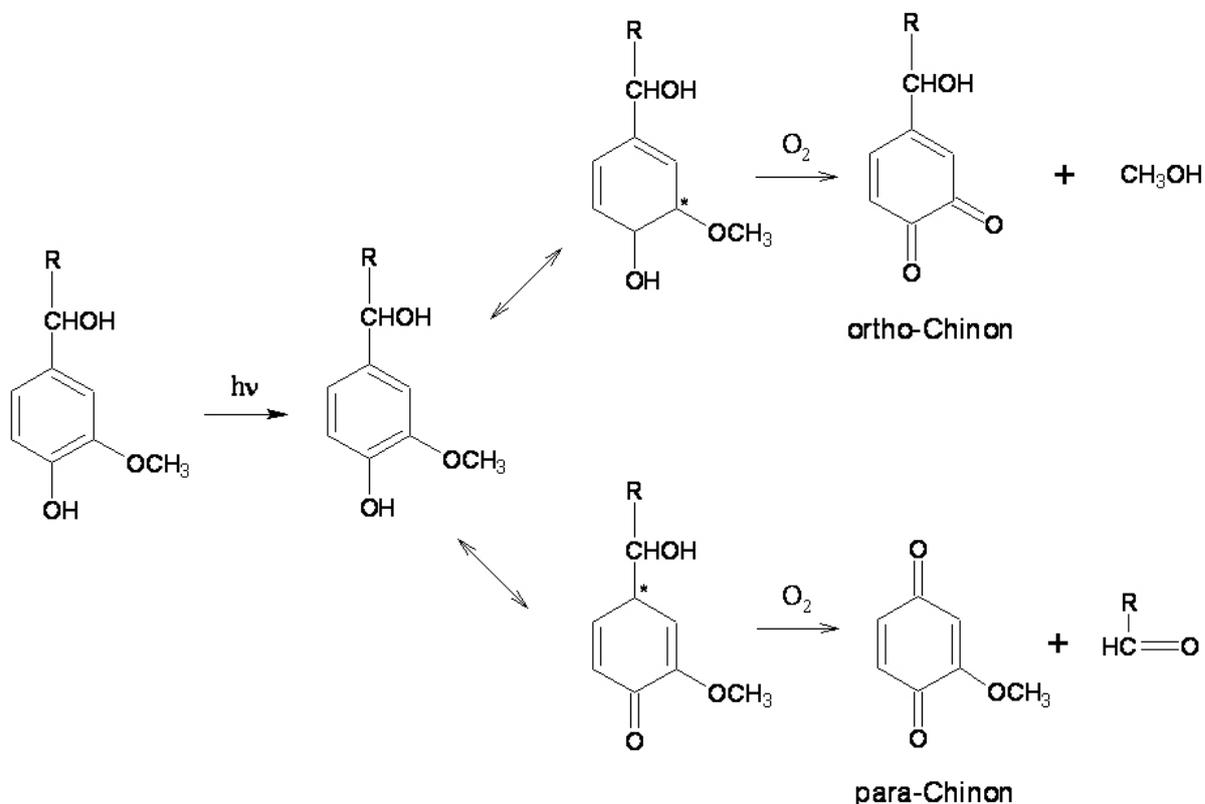


Abbildung 2.4: Reaktionsmechanismus zur Bildung von ortho- oder para-Chinon bei Belichtung phenolischer Lignineinheiten nach Kringstad und Lin (1970)

Die phenolischen Hydroxylgruppen im Lignin werden für den lichtinduzierten Abbauprozess als Voraussetzung benötigt (Leary 1967). Freie phenolische Hydroxylgruppen sind verantwortlich für die Reduzierung der Methoxygruppenkonzentration bei steigender Bestrahlungszeit (Leary 1968). Es werden unter anderem Methylradikale freigesetzt, die durch den Luftsauerstoff zu Peroxyl oxidieren (Hon und Minemura 2001). Ein Basisschritt für eine Vergilbung kann die Umwandlung eines Phenoxyradikals zu einem α -carbonyl- β -O-4 dimer sein (Jaeger et al. 1993), beispielsweise können vorliegende Phenoxyradikale zu ortho- und para-Chinonen (Abbildung 2.4) oxidiert werden (Castellan et al. 1993; Hon und Minemura 2001). Weitere Reaktionen bei dem Prozess der Vergilbung, wie der Phenacyl-Mechanismus und der Ketyl-Mechanismus, sind bekannt (Lanzalunga und Bietti 2000; Li und Ragauskas 2000).

2.3.4 Auswirkungen der Feuchtigkeit

DRIFT-(Diffuse-Reflektion-Infrarot-Fourier-Transformation) Untersuchungen zeigten bei den untersuchten Nadel- sowie Laubhölzern unwesentliche Veränderungen an den Absorptionsbanden während einer 400-stündigen Wasserbesprühung (Anderson et al. 1991a;b). Die Autoren folgerten keine chemische Beeinflussung und keine Auswaschungseffekte durch die ausschließliche Wasserbehandlung, dabei führten sie die Veränderungen auf die Probenoberfläche und die damit verbundene Messungenauigkeit zurück. Durch sein hygroskopisches Verhalten verändert Holz seinen Feuchtegehalt und passt sich der Umgebungsfeuchtigkeit an. Mit der Änderung der Holzfeuchte variiert auch seine Dimension. Bei Auftreten anderer Einflüsse können sich die Auswirkungen der Feuchtigkeit verstärken. Bei einer Lagerung von Kiefern- und Lindenholzproben unter Wasser und erhöhter Temperatur (über 65°C) über einen Zeitraum von 60 Tagen traten Verluste bei der Zugfestigkeit auf und es sank der pH-Wert des verwendeten Wassers (Evans und Banks 1988). Dieses Ansteigen des Säuregrades wurde auf den hydrolytischen Abbau des Holzes zurückgeführt. Das in Lösung gehen von Harzsäuren und Extraktstoffen wurde nicht näher untersucht.

2.3.5 Auswirkungen durch Säuren und Basen

Der Abbau von Holzbestandteilen durch Chemikalien findet überwiegend bei der Gewinnung von Zellstoff Anwendung. Die Hydrolyse und Oxidation sind die wichtigsten Abbauprozesse.

Bei den Kohlenhydraten sind die Acetal-Bindungen betroffen. Bei Lignin finden die Reaktionen über die α - und β -Aryl-Ether-Bindungen statt.

Die Hydrolyse der Cellulose und Polyosen tritt sowohl im sauren sowie im basischen Bereich auf, wobei die Auswirkungen im sauren Bereich größer sind. Im Lignin sind unterschiedliche Bindungen bei der Hydrolyse betroffen (Goldstein 1984). Dadurch wird die Ligninstruktur angegriffen, was für die chemisch-analytische Untersuchung Schwierigkeiten bereitet. Es haben sich verschiedene Standards für die Bestimmung des Ligningehaltes entwickelt, wie zum Beispiel die Analyse nach Runkel (Runkel und Wilke 1951).

Oxidative Reaktionen treten beim Lignin häufiger als bei den Kohlenhydraten auf. Die Zellstoffindustrie macht sich diesen Umstand beim Bleichen zunutze.

Einflüsse der Umwelt

Der pH-Wert des Niederschlages in Europa weist Werte im sauren Bereich auf (Wachtendorf et al. 2007). Bei der Volumenreduktion von Wassertropfen auf Oberflächen kann eine weitere Senkung des pH-Wertes erfolgen. Bei einem pH-Wert von etwa 4,3 konnte nach einer partiellen Abdunstung des Wassers ein pH-Wert von 1,8 ermittelt werden (Frevert und Klemm 1984). Im Regenwasser und Nebel sind Salz-, Schwefel- und Salpetersäure enthalten, jedoch kommt es bei der Abtrocknung zur Verdunstung von Salz- und Salpetersäure und am Ende ist nur mehr Schwefelsäure vorhanden (Wachtendorf et al. 2007). Durch den Einfluss von Schwefelsäure wird die Zugfestigkeit von Holz vermindert, dabei tritt eine Verstärkung des Einflusses bei der Temperaturerhöhung ein, nicht aber bei einer UV-Bestrahlung (Hon 1994).

2.3.6 Auswirkungen von holzerstörenden Pilzen

Die DIN EN 350-2 (1994) gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit des Holzes gegen einen Angriff durch holzerstörende Pilze und Insekten. Sie definiert Prüfverfahren und Beurteilungen der natürlichen Dauerhaftigkeit für die folgenden Organismengruppen: (1) natürliche Dauerhaftigkeit gegen holzerstörende Pilze, (2) natürliche Dauerhaftigkeit gegen Larven von Trockenholzkäfern, (3) natürliche Dauerhaftigkeit gegen Termiten und (4) natürliche Dauerhaftigkeit von Holz gegen Holzschädlinge im Meerwasser.

In Europa sind Pilze als Hauptgefährdung von Holz mit Bodenkontakt im Außenbereich einzustufen (Creemers et al. 2002). Nach Fengel und Wegener (2003) werden die holzerstörenden Pilze in Fäulnistypen, nämlich Braun-, Weiß- und Moderfäule, eingeteilt.

Braunfäule wird durch Basidiomyceten hervorgerufen und ist durch den Abbau von Cellulose, Polyosen und Pektin in der Holzzellwand gekennzeichnet. Das Lignin bleibt weitgehend unverändert zurück. Die schnelle Depolymerisation der Cellulose (Schmidt 2006) führt zu einer starken Reduktion der Festigkeit des Holzes.

Weißfäule wird durch Basidiomyceten und teilweise auch durch Ascomyceten verursacht. Neben Lignin und Pektin werden auch Cellulose und Polyosen angegriffen. Für die Zerstörung des Lignins müssen die Pilze Enzyme besitzen, die sowohl phenolische wie auch nicht-phenolische Bestandteile zersetzen (Schmidt 2006).

Moderfäule wird durch Ascomyceten und Deuteromycten hervorgerufen, die überwiegend in der verholzten Zellwand parallel zu den Mikrofibrillen wachsen. Cellulose und Polyosen werden abgebaut.

Für eine Aktivität der holzerstörenden Pilze sind hauptsächlich physikalische und chemikalische Einflussgrößen ausschlaggebend. Nach Schmidt (2006) ist es die Nährsubstanz (kohlenstoffhaltig), das Luftangebot (Sauerstoff), der Holzfeuchtegehalt (Minimum 26-30%), die Temperatur (Minimum 0-8°C), der pH-Wert (optimal 4-6) und das Lichtangebot (weniger als in einer sternklaren Vollmondnacht), die annähernd vorhanden sein müssen, damit Pilze wachsen können.

2.4 Veränderungen der Oberfläche bei der Verwendung von Vollholz

Während der Verwendung ist das Holz unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt, dadurch können Veränderungen entstehen. Eine Einteilung ist notwendig, um zwischen den ungewollten und erwünschten Veränderungen unterscheiden zu können. Jede Veränderung der Produkteigenschaften, welche bei Prozessen auftritt und eine Wertminderung des Produktes oder die Gebrauchsunfähigkeit verursacht, stellt einen Fehler dar und folglich einen Kostenfaktor oder Imageverlust. Beispielsweise schätzen Experten alleine durch Verfärbungen bei der Holz Trockung von Laubschnittholz einen Verlust von 5 %, rund 3 Millionen Euro pro Jahr österreichweit (Putz et al. 2007). Erwünschte Veränderungen verbessern die Eigenschaften von Holz, führen zu einer Qualitäts- und Wertsteigerung, wie etwa bei der Farbhomogenisierung durch die Dämpfung von Holz.

Die Farbe als ein Kriterium zur Beurteilung der Veränderungen ist sinnvoll, da sie einen großen Stellenwert in unserem täglichen Leben hat. Deshalb gibt es Bestrebungen, die Farbe von natürlichem Holz zu verändern und vor allem eine Verbesserung der Farbstabilität zu erreichen.

2.4.1 Überblick der Veränderungen im Außenbereich

Holz unterliegt im Außenbereich einem Abbauprozess, was im Sinne der biologischen Rückführung in die natürlichen Kreisläufe positiv zu werten ist, aber die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung einschränkt. Das Holz sollte geschützt werden. Unter konstruktivem Holzschutz werden alle Maßnahmen verstanden, die das Holz vor einer dauernden Belastung durch Feuchtigkeit (Nieder-

schlag und Tauwasser) und Insektenbefall schützen. Der Grundgedanke dieses Holzschutzes geht von der Tatsache aus, dass bei trockenem Holz kein Befall von holzerstörenden Pilzen möglich ist. Bei Einhaltung dieses Grundsatzes können Festigkeitsverluste des Holzes vermieden werden.

Die Holzverwitterung wird hauptsächlich durch photochemische Mechanismen, Rißbildungen und Erosion sowie durch Besiedelung mit dunkelfarbigen Mikroorganismen gekennzeichnet (Sell und Leukens 1971; Sell 1975).

Beim Holz führt die Einwirkung von UV-Licht zu einem Abbau des Lignins und der Polyosen (Kleinert 1970; Tolvaj und Faix 1995; Pandey 2005b). Extraktstoffe des Holzes werden ebenfalls verändert (Pandey 2005a). Doppelbindungen werden aufgespalten, Carbonylgruppen abgespalten und die Polyosen unterliegen einer Hydrolyse. Neue chromophore Gruppen bilden sich, es kommt zu Verfärbungen (Feist und Hon 1984; Evans et al. 1992). Risse bilden sich im Holzstrahlenbereich (Kučera und Sell 1987) und in der Feinstruktur (Sandberg 1999; Evans et al. 2008). Die Risse führen zur Verringerung der Festigkeit des oberflächennahen Zellverbandes (Evans und Banks 1988; Derbyshire et al. 1995). Bei anhaltender Bewitterung vergrößern sich die Risse (Sandberg 1999). Durch den Niederschlag werden die wasserlöslichen Abbauprodukte ausgewaschen (Hon und Chang 1984). Evans et al. (1992) isolierte Xylose und Mannose durch die Wasserextrahierung von natürlich bewittertem Kiefernholz (*Pinus radiata*). Bei der Untersuchung von Holocellulose zeigt sich eine Verringerung der Gehalte von Mannose, Xylose, Arabinose und Galactose im Vergleich zu unbewitterten Oberflächen. Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und der Dichte lassen das Holz ungleichmässig erodieren. Dabei wird der Frühholzbereich im Anfangsstadium stärker als der Spätholzbereich beansprucht (Feist und Mraz 1978). Jedoch schreitet dieser Prozess sehr langsam voran, bei Frühholzzellen etwa 101 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ und im Spätholzbereich ca. 34 $\mu\text{m}/\text{Jahr}$ bei Kiefernarten (Williams et al. 2001). Feist und Mraz (1978) schätzen einen Abtrag der Oberfläche aufgrund künstlicher Bewitterungsversuche bei Douglasienholz von 5-12 mm in 100 Jahren. Bei künstlichen Bewitterungsversuchen mit Schwefelsäure mit einem pH-Wert von 2,0 und 4,0 kommt es zur einer Verdoppelung der Erosionsraten (Williams 1991). Bei periodischen Durchfeuchtungen kann die Holzoberfläche durch Pilze besiedelt werden (Sell und Leukens 1971). Butin (1991) bestimmte 12 verschiedene Arten der Hyphomycetes an 18 Jahren bewitterten Fichtenholzoberflächen auf über 1400 m Seehöhe. Diese sind nicht primär am Ligninabbau beteiligt, können jedoch vorgeschädigtes Lignin abbauen. Sell (1968) und Kühne et al. (1970) machen die Besiedlung dieser Pilze („Vergrauungspilze“) für die eigentliche Vergrauung von Holz im Außenbereich verantwortlich.

2.4.2 Überblick der Veränderungen im Innenbereich

Gegenüber dem Außenbereich sind in Innenräumen und geschützten Außenbereichen (z.B. unter Dachvorsprüngen) andere Umwelteinflüsse zu finden, da Teile der äußeren Umwelteinflüsse (Sonnenstrahlung, Niederschlag) abgeschirmt oder abgeschwächt sind. An Holz werden auch unterschiedliche Anforderungen gestellt. Neben den mechanischen Festigkeitseigenschaften und der Dimensionsstabilität ist die optische Eigenschaft ein entscheidendes Merkmal für die Verwendung (Devantier et al. 1993).

Durch den Einfluss der gefilterten Sonnenstrahlung verändert sich die Holzfarbe. Ein Vergilben konnte bei Fichten und Buchenholz während eines Jahres festgestellt werden (Schöftner 1989). Bei Bestrahlung durch UV-Licht wurden bei verschiedenen Holzarten unterschiedliche Farbänderungen ermittelt (Sandermann und Schlumbom 1962a;b). Es ergaben sich rötliche, gelbliche, dunkle und helle Veränderungen. Sie veränderten sich nicht im Zusammenhang mit der Zeit und wiesen ein sprunghaftes Verhalten auf. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch von Oltean et al. (2008) veröffentlicht. Bei den 16 untersuchten Laub- und Nadelhölzern auf ihre Verfärbungen durch Bestrahlung wurde bei Eichenholz der geringste ΔE -Wert (Abschnitt 3.2.5) und bei Fichtenholz der größte Wert festgestellt.

2.4.3 Überblick der Veränderungen bei der Holzmodifikation

Um eine Verbesserung der Eigenschaften von Holz zu erreichen, werden in jüngster Vergangenheit verschiedene Vergütungsverfahren eingesetzt. Einige sind noch in der Entwicklung, andere sind bereits industriell umgesetzt. Derzeit können folgende Vergütungsprozesse mit einer Auswirkung auf die Bestandteile der Zellwände eingesetzt werden: Harzvergütung, Verkieselung, Acetylierung und Hitzevergütung (Militz 2000; Rapp et al. 2000).

Eine Modifikation findet hauptsächlich an den Hydroxylgruppen der Cellulose und Polyosen in der Zellwandstruktur statt, mit Ausnahme der Einlagerung von Harzen in das Lumen. Die Zellwandpolymere und ihre Hydroxylgruppen sind für die meisten physikalischen und chemischen Eigenschaften des Holzes verantwortlich (Rowell 1991). Ein Verändern oder Abbau dieser Bestandteile hat daher Auswirkungen auf die Holzeigenschaften.

2.4.3.1 Harzvergütung

Der Einsatz von Natur- und Kunstharzen zur Holzmodifikation wird seit den letzten Jahren praktiziert (Zimmer et al. 2005). Eine Imprägnierung kann nach einem Druck-Vakuum Prozess erfolgen, mit anschließender Vernetzung bei Temperatureintrag. Eine Einteilung der Harze kann anhand der chemischen Bindungen erfolgen, da zum einen Harze mit den Zellwandpolymeren reagieren und zum anderen sich die Harze ausschließlich im Zelllumen einlagern. Nur angelagerte Harze im Lumen setzen die Sorptionseigenschaft herab und verbessern die Härte- und Abriebeigenschaften des Holzes. Jedoch bieten sie nur eine geringfügige Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Witterungsbeständigkeit (Rapp und Augusta 2000).

Bei Dimethyloldihydroxyethylenharnstoff (DMDHEU) handelt es sich um ein Kunstharz, das seit langem großtechnisch in der Textilindustrie eingesetzt wird und in der Lage ist, mit den Bestandteilen der Holzzellwand chemisch zu reagieren (Rapp und Augusta 2000). Durch die Modifizierung mit DMDHEU sinkt die Zugfestigkeit in Abhängigkeit des Beladungsgrades (Xie et al. 2007).

Melamin ist ein klassisches Produkt der Petrochemie und die duroplastischen Harze sind farblos sowie chemikalien- und temperaturbeständig. Durch die Vergütung mit 10 % Melaminharz erreicht nicht dauerhaftes Kiefern-Splintholz das Niveau von ausländischen Holzarten der höchsten Dauerhaftigkeitsklasse. Der E-Modul verbessert sich um 10 % bei einer Beladung von 20 % WPG (weight percent gain) bei gleichzeitiger Verringerung der Bruchschlagarbeit. Die Antishrinkage Efficiency (ASE) beträgt in Abhängigkeit des Beladungsgrades bis 40 % (Zimmer et al. 2005).

2.4.3.2 Verkieselung

Bei der „Verkieselung“ werden Siliziumkomponenten an den Hydroxylgruppen der Zellwand unter Bildung von Ester- und Etherbindungen kondensiert (Rowell 1991). Siliziumkomponenten an der Oberfläche bewirken eine anhaltende Hydrophopierung des Holzes (Sèbe und Brook 2001). Dabei wird nicht nur ein verbessertes Quell- und Schwindverhalten, beispielsweise bei Kiefer (*Pinus silvestris* [L.]) und Buche (*Fagus silvatica* [L.]), erreicht (Donath et al. 2007; 2004), sondern auch ein günstigeres Brandverhalten und eine Zunahme der Härte des modifizierten Holzes (Militz 2000). Durch diese Vergütung kann die größere Härte des behandelten Holzes problematisch für die Holzbearbeitung sein, was eine schnellere Abstumpfung der Schneidwerkzeuge bewirkt. Jedoch bewirkt die „Verkieselung“ eine verbesserte Lichtstabilität bei vergütetem Kiefernholz während einer

künstlichen Bewitterung (Donath et al. 2007). Das vergütete Holz wird resistenter gegenüber holzerstörenden Pilzen, da mit steigendem Beladungsgrad der Masseverlust durch den Abbau der Pilze verringert wird (Hill et al. 2004).

2.4.3.3 Acetylierung

Die Acetylierung führt zu einer chemischen Reaktion zwischen dem Holz und dem eingesetzten Essigsäureanhydrid, dabei werden die hydrophilen Hydroxylgruppen durch weniger hydrophile Acetalgruppen ersetzt (Popper und Bariska 1975; Militz 1991). Während der Reaktion entsteht als Nebenprodukt freie Essigsäure, wobei diese nach Abschluss der Acetylierung technisch aus dem Holz entfernt werden muss (Militz 1991). Der Acetylierungserfolg kann durch IR-Spektroskopie (Militz 2000), Auswaschwiderstand und Volumenzuwachs festgestellt werden (Rowell 1991).

Durch eine Vakuum- oder Druck-Prozessstufe wird das Essigsäureanhydrid als acetylierendes Medium in das Holz hineingebracht (Militz 2000; Ekstedt 2002). Der eigentliche Veresterungsprozess zwischen dem Holz und dem Essigsäureanhydrid verläuft exotherm und sollte bei etwa 120°C stattfinden (Militz 1991; Ekstedt 2002). Eine Entwässerung und anschließende Vakuumbehandlung entfernt teilweise das Nebenprodukt Essigsäure aus dem Holz (Militz 2000).

Durch die Anlagerung der hydrophoben Acetylgruppen wird die Wasseraufnahmefähigkeit des Materials deutlich herabgesetzt (Popper und Bariska 1972) und das Quell- und Schwindmaß des acetylierten Holzes ist signifikant niedriger als bei unbehandelten Hölzern (Popper und Bariska 1975; Youngquist et al. 1986; Rowell 1991). So ist zum Beispiel bei Versuchen mit Buchenholz eine Reduzierung der Quellung und Schwindung des acetylierten Holzes sowohl radial als auch tangential um 60-80% festgestellt worden (Militz 1991).

Bei der Druckfestigkeit der behandelten Hölzer wurde eine signifikante Erhöhung von ca. 10% gegenüber den unbehandelten Hölzern festgestellt. Ein Einfluss der Acetylierung auf den E-Modul konnte jedoch nicht nachgewiesen werden (Militz 1991).

Durch das Acetylierungsverfahren wird die Reaktivität der Holzoberfläche mit möglichen Wassermolekülen herabgesetzt. Dieser Effekt ist aber nur kurzzeitig gegeben, da bereits nach einer Minute Einwirkzeit von Wasser der Benetzungswinkel an acetyliertem Holz und unbehandeltem Holz sich annähern (Pecina und Paprzycki 1990).

Die biologische Resistenz von acetyliertem Holz gegenüber holzerstörenden Pilzen, beispielsweise Braunfäule (*Coniophora puteana*, Schum. ex Fr.), weist bei der chemischen Modifikation des kor-

sischen Kiefernspiltholzes (*Pinus nigra* [S.]) eine gute Korrelation zwischen Acetylierungsgrad und biologischer Widerstandsfähigkeit auf (Papadopoulos und Hill 2002). Eine Massenzunahme (WPG) von über 18% durch die Acetylierung ist im Allgemeinen ausreichend, um einen weitgehenden Schutz gegen den Angriff von holzerstörenden Pilzen zu erreichen (Papadopoulos und Hill 2002).

Acetyliertes Holz zeigt ferner eine bessere Lichtstabilität und eine verminderte Rissbildung bei der Verwitterung auf als unbehandeltes Holz (Plackett et al. 1992; Zimmer et al. 2003) und hat Einflüsse auf eine verwendete Beschichtung (Zimmer et al. 2004). Bei acetyliertem Buchenholz konnten geringere Farbdifferenzen bei einer künstlichen Bewitterung von über 1800 Stunden sowohl an beschichteten sowie unbeschichteten Holzoberflächen festgestellt werden (Schnabel 2003). Ferner ist der Abbauprozess von Früh- und Spätholz von acetylierten Holzproben signifikant geringer als bei unbehandeltem Holz (Imamura 1993).

2.4.3.4 Hitzevergütung

Die derzeit führenden Verfahren können grob in die nachfolgenden Verfahrensgruppen eingeteilt werden: (1) Wasserdampf-Verfahren, (2) Feucht-Wärme-Druck (FWD), (3) Öl-Hitze-Verfahren und (4) Inertgas-Verfahren.

Alle diese Verfahren machen sich das Prinzip zunutze, dass sich die Zellwandbestandteile bei erhöhten Temperaturen (über 150°C) chemisch verändern (Sandermann und Augustin 1963a). Die Verfahren unterscheiden sich vor allem in der Art der Wärmeübertragung auf das Holz sowie in der Methode, wie eine vollständige Oxidation des Holzes bei den hohen Temperaturen verhindert werden kann, beispielsweise wird beim Wasserdampf-Verfahren durch das Einblasen von Wasserdampf in die Prozesskammer der Sauerstoffgehalt in der Kammerluft reduziert. Einen Überblick der unterschiedlichen Verfahren geben Stingl et al. (2002).

Ausgehend von Runkel (1951), Fengel (1966a) und Fengel und Przyklenk (1970) wurden die Auswirkungen von einer Wärmebehandlung von Holz und dessen Bestandteilen systematisch aufgearbeitet. Tjeerdsma und Militz (2005) führten FTIR-Analysen von wärmebehandelten Buchen und Kiefernholz durch und analysierten funktionelle Gruppen der Holzbestandteile. Die Abspaltung von Acetylgruppen der Polyosen wurde bei der Aufheizphase unter Wasserdampf bestimmt, infolgedessen entstand Essigsäure und weitere Carbonsäuren. Bei weiterer Steigerung der Temperatur verstärkte sich dieser Effekt. Vor und nach der Behandlung wurden die freien Hydroxylgruppen

im Holz durch Acetylierung bestimmt. Bei Lignin entstanden neue Estergruppen. Eine Reduktion der freien Hydroxylgruppen und die Esterbildung waren die Folge der thermischen Behandlung. Tjeerdsma und Militz (2005) schlussfolgerten, dass durch die Veresterungen am Lignin ein hygroskopisches und dimensionsstabiles Holz erzeugt wird. Windeisen et al. (2008) zeigten, dass die Reduktion der Holzausgleichsfeuchte vorwiegend auf den Abbau der Polyosen zurückzuführen ist. Giebeler (1983) untersuchte hitzebehandeltes Holz nach dem FWD-Verfahren auf seine Eigenschaften. Die Ergebnisse zeigten eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit und eine Abnahme des Sorptionsvermögens von 50-80%. Neuere Untersuchungen von Hanger et al. (2002a;b) zeigen vergleichbare Ergebnisse. Die biologische Resistenz von wärmebehandeltem Holz kann eine Steigerung von 2-3 Dauerhaftigkeitsklassen (DIN EN 350-2) erreichen Hanger et al. (2002a). Bei Biegefestigkeiten von Hölzern sind Abnahmen je nach Behandlungsintensitäten feststellbar. Der Biegeelastizitätsmodul erfährt eine Steigerung bei leichten Behandlungstemperaturen (bis 190 °C), kann aber durch zu intensive Behandlungen (Temperatur über 200 °) bei Fichte und Buche abfallen (Hanger et al. 2002b; Bekhta und Niemz 2003; Schnabel et al. 2007). Rusche (1973) analysierte den Druckelastizitätsmodul bei Buche und Fichte nach einer Wärmebehandlung und stellte einen Zusammenhang zwischen dem E-Modul und dem Masseverlust her. Bei Temperaturen von 150 bis 200°C konnte ein Masseverlust von 1-7 % bei Fichtenholz und 1-12 % bei Buchenholz festgestellt werden. Die Behandlungen von Eschenholz bei zwei Temperaturbereichen von 160 und 200°C wiesen einen Masseverlust von etwa 4 und 10 % auf (Windeisen et al. 2008). Durch die Wärmebehandlung verändert sich die Holzfarbe (Chow und Mukai 1972; Bourgois et al. 1991; Zimmer et al. 2008). Die Farbtöne sind je nach Behandlung und Holzart unterschiedlich und reichen von leicht bräunlich bis hin zu dunkelbraunem Farbton über den ganzen Holzquerschnitt (Schnabel et al. 2007). Des Weiteren wurde durch eine Wärmebehandlung von Eschen- und Buchenholz eine Farbhomogenisierung des vorhandenen fakultativen Farbkernes erreicht (Oelhafen et al. 2006).

2.5 Farbwahrnehmung von Oberflächen

Farbe entsteht bei einfallendem Licht eines Wellenlängenbereiches auf die Netzhaut im Auge und einer damit verbundenen Nervenregung in menschlichem Gehirn (Wyszecki und Stiles 2000). Somit ist das Farbsehen des Menschen ein Akt der sinnlichen Wahrnehmung und ist mehr als bloßes Sehen. Rodeck et al. (2002) spricht von Farbe als wesentlichem Element in der Umwelt, welche zur Information, Kommunikation und der Gestaltung dient.

2.5.1 Physiologische Aspekte der Farbwirkung

Blau ist rein physikalisch gesehen ein Reiz bei Wellenlängen von etwa 420 bis 500 nm. Der Mensch empfindet die Farbe Dunkelblau als „beruhigend, dämpfend“ und assoziiert Seriosität und Tradition (Rodeck et al. 2002). Ein grüner Farbreiz kann beispielsweise Gedanken über die Natur auslösen (Küppers 2000) und vielleicht Erinnerungen an eine Wanderung zur einer Almhütte auslösen. Fusseder (2003) beschreibt helle Nadelhölzer als anmutig und freundlich, helle Laubhölzer als kühl und leicht, dunkle Hölzer als wuchtig und repräsentativ. Materialien als Farbträger und farbige Anstrichflächen müssen den Ansprüchen der Ergonomie, der Optik, der Ästhetik und des Gebrauchs dienen (Rodeck et al. 2002). Alle Elemente einer Wahrnehmung wirken aufeinander ein, beeinflussen sich gegenseitig und steigern sich oder werten sich ab (Ebner 2004). Für detaillierte Informationen zu dieser Thematik sei auf die in großer Zahl vorhandene Spezialliteratur verwiesen z. B. Schmatz und Zobernig (1995), Küppers (2000), Rodeck et al. (2002), Batchelor (2002), Frieling (2005) und Silvestrini et al. (2005).

2.5.2 Subjektivität der Farbempfindung

Zum einen kann die Farbe ein wichtiges Merkmal von Produkten und deren Qualität sein, zum anderen ist die Farbwahrnehmung von vielen Faktoren beeinflusst und wird von den Menschen subjektiv wahrgenommen. Neben den physikalischen Einflussfaktoren, wie Lichtart, Blickwinkel und Streueffekte (Nassau 2001), beeinflussen die menschlichen Faktoren, wie beispielsweise Alter und Fehlsichtigkeit, die Wahrnehmung von Farbe (Steckert 2003). Um diesen Umständen experimentell gerecht zu werden, wurden standardisierte Verfahren zur Beurteilung von Farbunterschieden entwickelt. Unter Einhaltung definierter Bedingungen kann ein Vergleich zwischen Referenzmuster und Prüfprobe visuell erfolgen und in Bewertungsklassen eingeteilt werden ÖNORM EN ISO 3668 (2001). Subjektive Beurteilungen von Farbdifferenzen durch den Menschen können jedoch nicht ausgeschlossen werden (Steckert 2003). Die Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) stellte zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein Konzept für die objektive Farbmessung und Darstellung vor (Wyszecki und Stiles 2000). Im Jahre 1931 wurden die Ergebnisse im chromatischen Diagramm der CIE zusammengefasst.

2.5.3 Farbmatrik

Drei Arten von Rezeptoren mit verschiedener spektraler Empfindlichkeit im Blau-, Grün- und Rotbereich können auf der Netzhaut im Auge unterschieden werden (Wyszecki und Stiles 2000). Dieses Modell mit den unterschiedlichen Empfindlichkeitskurven wird auch in der Farbmatrik verwendet. Dabei handelt es sich um die Absorptionskurven der in die drei Zäpfchentypen eingelagerten Farbstoffe (Wyszecki und Stiles 2000). Licht bestimmter Zusammensetzung reizt die drei Rezeptoren im Blau-, Grün- und Rotbereich, und im Gehirn löst die entstehende Nervenerregung eine Farbbeimpfung (Farbreiz) aus. Mit diesen drei spektralen Verteilungen lässt sich jeder Farbreiz vollkommen nachahmen (Völz 2001). Dieser Formulismus der Farbreize setzt sich wiederum aus den Farbwerten (X, Y, Z) oder Farbwertanteilen (x, y, z) zusammen (Wyszecki und Stiles 2000). Die Aufsummierung der Anteile der Wellenlänge von 400 bis 700 nm liefert den Ausgangsfarbreiz und durch den Koeffizientenvergleich (Normfarbwerte und tatsächliche Werte) ergeben sich die Farbwerte des jeweiligen Farbreizes. Für Körperfarben ist die Spektralverteilung der Reflexionsgrad (Remissionsgrad), der bei der Beleuchtung mit weißem Licht gemessen wird. Die Reflexionsgrade dienen für die Gestaltung der Farbräume als Grundlage und werden im CIEL*a*b* System verwendet (Völz 2001). Abbildung 2.5 zeigt schematisch die Methode der Farbwahrnehmung und Farbmessung an Oberflächen. X_n , Y_n und Z_n sind die Normfarbwerte der beleuchteten Lichtart und Winkel des Beobachters. Für alle Normlichtarten gilt Y_n ist 100. Die Umrechnung von den Farbwerten in den CIEL*a*b* Farbraum erfolgt durch einen dem Logarithmus ähnlichen funktionellen Zusammenhang, der den physiologisch gleichabständigen Helligkeitsstufen Rechnung trägt (Völz 2001). Andere Darstellungen der Farbräume werden durch lineare Transformationen der Farbwerte erreicht.

2.5.4 Farbmessung von Holzoberflächen

Die Inhomogenität des Holzes stellt besondere Anforderungen an die Farbmessung und deren Interpretation. Die chemische Zusammensetzung, die Holzmerkmale und die drei Schnittrichtungen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Farbmessung (Abbildung 2.6).

Holz selbst absorbiert einen Teil des sichtbaren Lichtes, in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung (Sandermann und Schlumbom 1962a; Morgan und Orsler 1968; Polcin und Rapson 1969). Hauptverantwortlich für die Farbe der Holzoberfläche sind chromophore Gruppen, wie Chinone,

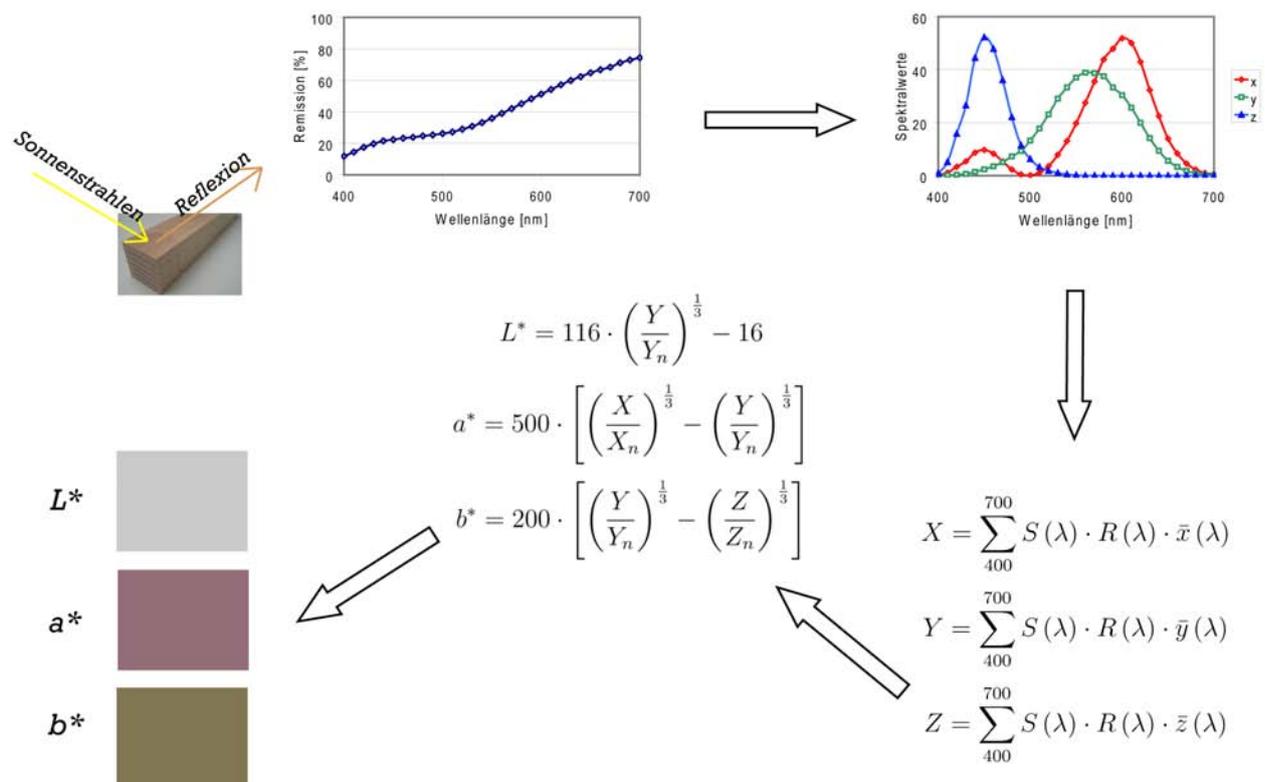


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Farbmessmethode

Stilbene und Carbonylgruppen sowie solche des Lignins und der Extraktstoffe. Weiter beeinflussen die Schnittrichtung und die Oberflächenstruktur die Farmpfindung. Unterschiede bei der Wahrnehmung zwischen sägerauen und gehobelten Oberflächen sind deutlich.

Die objektive Erkennung und Messung der Holzfarbe ist nach dem gegenwärtigen Stand der Technik möglich und verschiedene Gerätschaften werden eingesetzt. Das Photospektrometer arbeitet meist nach dem Prinzip der Ulbricht-Kugel. Eine Messkammer wird auf die Oberfläche aufgesetzt. Die Lichtquelle und der Messensor sind in der Kammer, eine definierte Meßgeometrie existiert. Spektrometer mit Lichtleiterkabel ermöglichen eine berührungslose Messung. Die Oberfläche wird mit Licht aus dem Leiterkabel beaufschlagt, das reflektierte Licht von den Faserbündeln oder dem Sensor teilweise aufgefangen, zur Messeinheit weitergeleitet und ausgewertet. Durchführung von einigen Messungen in der Sekunde sind möglich, jedoch sollten die Umgebungsbedingungen (z. B. Einstrahlwinkel, Abstand zur Oberfläche, Lichtverhältnisse) konstant sein. Flächen- oder Zeilenkameras tasten Oberflächen vollständig ab, dadurch sind große Mengen an Informationen vorhanden und müssen mit Bildbearbeitungssystemen automatisiert aufbereitet werden.

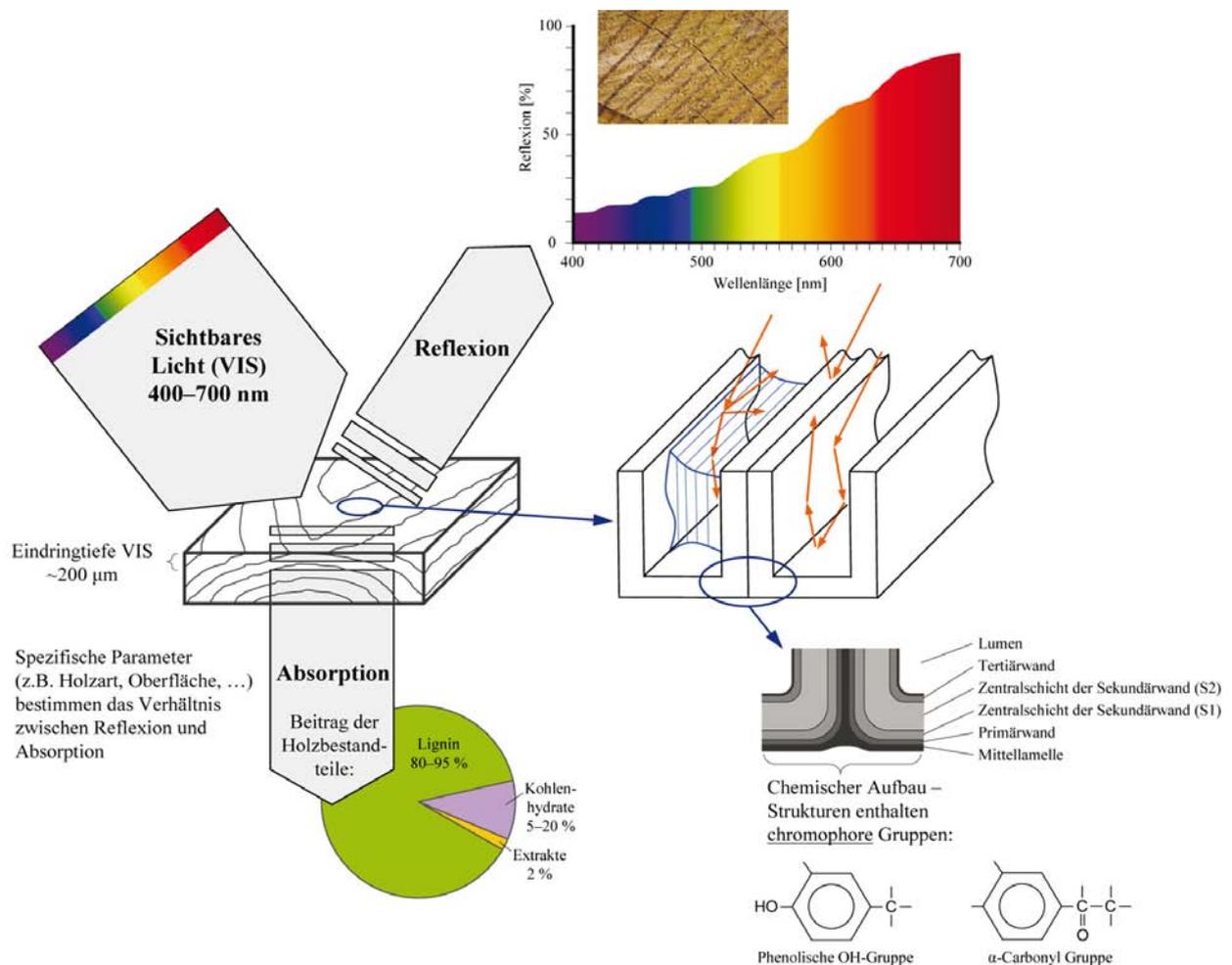


Abbildung 2.6: Darstellung der Farbwarnahme an Holzoberflächen (Pöckl 2007)

2.5.4.1 Anwendungen eines Photospektrometers

Eine Literaturübersicht über die Anfänge der Farbmessung an Holz veröffentlichte Sullivan (1967b) und nannte farbmessungsmetrische Untersuchungen bei der Buchenholzdämpfung aus dem Jahre 1934 als den ersten Einsatz dieser damals neuen Methode. Weitere Anwendungen dieser neuartigen Methode folgten, jedoch wurde meist nur der Y-Farbwert (Helligkeitsmaß) bestimmt.

Sandermann und Lüthgens (1953) analysierten Verfärbungen von 13 Holzarten bei unterschiedlichen Einflüssen wie pH-Wert-Änderungen, Eisenkonzentrationen und UV-Licht. Die Auswertung erfolgte über die Helligkeitsänderung. Ausgehend von Sandermann und Schlumbom (1962a) wurden Remissionsgrade (Grundlage der Farbmesssysteme) an Holz bestimmt. Zunächst erstreckten sich die Untersuchungen auf 11 Holzarten in pulverisiertem Zustand mit dem Ziel, den Einfluss von

ultraviolettem Licht auf die visuelle Wahrnehmung zu analysieren. Durch die Verwendung der Kubelka-Munk-Theorie konnten die einzelnen Absorptionskoeffizienten „k“ der Holzarten bestimmt und die Änderung während der Bestrahlung mittels eines Hochdruck-Quecksilberdampflichterstrahlers mit unterschiedlichen Filtern verfolgt werden. Die zweite Mitteilung von Sandermann und Schlumbom (1962b) handelt von farbmtrischen Bewertungen der Verfärbung an gemesserten Oberflächen von 74 Holzarten. Als Grundlage diente die CIE-Normfarbtafel. Eine nicht einheitliche Farbänderung bei den Hölzern wurde festgestellt. Webb und Sullivan (1964) bestätigte die unterschiedliche Farbänderung bei 2 Nadelholzarten und einer 64 stündigen UV-Bestrahlung mit zyklischer 2 stündiger Wasserbesprühung. Bei Kiefer-Furnieren (*Pinus taeda* [L.]) wurde nach einer 100-stündigen Sonnenbestrahlung eine unmerkliche Farbveränderung beschrieben. Das Konzept der Kubelka-Munk-Theorie griffen Pastore et al. (2004) auf und analysierten die Verfärbungen von 4 Tropenholzarten während 100 Stunden UV-Bestrahlung mit 350 nm Wellenlänge. Aufgrund des Anstieges der Kubelka-Munk Einheiten im Wellenlängenbereich unter 600 nm während der Bestrahlung wurde auf die Bildung von neuen chromophoren Gruppen des Lignins und der Extraktstoffe durch den Einfluss der Verfärbung geschlossen. Bei Untersuchungen von zwei Laubhölzern (black cherry und yellow-poplar) wurden keine signifikanten Unterschiede bei den Farbwerten zwischen radialer und tangentialer Richtung festgestellt (Sullivan 1967a). Vergleichbare Aussagen über die Gleichheit der Farbwerte zwischen radialer und tangentialer Oberfläche von 22 Hölzern bestätigte Beckwith (1979). Beide Autoren verwendeten ein Photospektrometer für die Analyse.

2.5.4.2 Anwendung eines Spektrometers mit Lichtwellenleiter

Maristany et al. (1994) untersuchten den Einfluss der Holzoberflächenstruktur auf die Messung der Remissionsdaten. Sie verwendeten einen Beleuchtungswinkel von 45° zur Oberfläche und eine senkrechte Sensoranordnung für die reflektierten Lichtstrahlen (45/0). Eine größere Rückstrahlung des Lichtes konnte gegen die Faserrichtung festgestellt werden. (Rinnhofer et al. 2003) variierten den Beleuchtungswinkel (8 bis 76°) bei der Farbmessung und zeigten einen starken Einfluss auf die Helligkeit (L^*) und eine unmerkliche Veränderung der a^* und b^* Werte. Mit dem Versuchsaufbau 45/0 parallel zur Faserrichtung wurden die Holzarten von Douglasie, Fichte und Kiefer mit den Remissionsdaten eindeutig unterschieden (Brunner et al. 1996a).

2.5.4.3 Anwendung einer Zeilenkamera oder Scanner

Für die Klassifikation von Druckholz bei Tanne setzten Nyström und Hagman (1999) eine Schwarz-Weiss-Kamera ein. Sie nutzten den höheren Ligningehalt bei Druckholz aus. Bei 11 von 14 Fällen wurde eine klare Trennung des Druckholzbereiches möglich. Eine 92-94 prozentige richtige Klassifizierung des Druckholzbereichs bei Fichten und Kiefern wurden durch den Einsatz einer Mehrkanalkamera erreicht (Hagman 1997). Der Einfluss der Poren und Holzstrahlen bei Laubhölzern auf die Farbwerte konnte durch Abtasten der Oberfläche mit einem Flachbettscanner nachgewiesen werden (Liu und Furuno 2001; 2002). Die Holzoberfläche konnte nicht als einheitlich gewertet werden, da die Helligkeitswerte der Poren und Holzstrahlen gegenüber dem anderen Holzgewebe variierten.

2.6 Objektivierung von Veränderungen

Methoden für eine Abschätzung der Materialveränderung während der Anwendung können nach Wypych (2003) in drei Kategorien unterteilt werden:

- Prüfverfahren
- Bewertung der Veränderungen oder Messung von Materialeigenschaften
- Mathematische Analyse der Daten

Anhand dieser Ansätze können die Leistungsfähigkeit von Materialien geprüft und bewertet werden. Trotzdem bleibt die Vorhersage der Veränderungen der Eigenschaften schwierig.

2.6.1 Prüfverfahren

Generell können die Auswirkungen der unterschiedlichsten Umwelteinflüsse auf ein Material geprüft werden. Jedoch sind nur solche Einflüsse entscheidend, die einer langen Gebrauchsdauer der Produkte entgegenwirken (Vogl 1999). Beim derzeitigen Stand der Technik können reine Feldversuche, künstlich unterstützte Feldversuche und künstliche Umweltsimulationen unterschieden

werden (Wypych 2003). Jedoch werden in Normen und umgangssprachlich auch andere Begriffe, wie Freibewitterung und natürliche Bewitterung sowie künstliche Bewitterung, künstliche Bestrahlung, Simulation und Umweltsimulation, verwendet. Häufig wird als Umweltsimulation die reproduzierbare Nachbildung von Umweltparametern im Labor zur Ermittlung der Auswirkungen auf das Material verstanden (Vogl 1999; Loidl 2006).

2.6.1.1 Freibewitterung

Für Feldversuche von Holz ohne Erdkontakt sind derzeit keine gültigen Normen vorhanden. Die DIN EN 927-3 (2007) regelt die Prüfung von Beschichtungsstoffen auf Holzoberflächen im Außenbereich, dabei wird der Begriff „Freibewitterung“ verwendet und setzt keine Abschirmung der Umwelteinflüsse voraus. Als Prüfdauer wird 1 Jahr vorgeschrieben. Die Ergebnisse solcher Freibewitterungen lassen wenig Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit mit den derzeit verwendeten Methoden zu (Roux et al. 1988; Creemers et al. 2002), da keine Übereinstimmungen von unterschiedlichen Bewitterungsstandorten, Jahren und Auslegungszeitpunkten erreicht werden konnten. Die Auswirkungen sind zu vielseitig und können durch einzelne Ereignisse oder Umwelteinflüsse (etwa Hagel) signifikant verändert werden. In Nordamerika (z. B. Florida und Arizona) werden große Flächen für Freilandversuche unterhalten und an diesen Standorten werden auch unterstützte Freibewitterung (etwa erhöhte Strahlenbelastung durch Umlenkung des Sonnenlichtes) durchgeführt (Wypych 2003). Diese Standorte haben sich als Standard für die Materialprüfungen im Außenbereich verbreitet und sowohl Lack- und Kunststoffhersteller wie auch Autoproduzenten lassen ihre Produkte auf solchen Flächen prüfen (Bauer 2000). Vergleichend dazu werden Materialien an europäischen Standorten geprüft. Jedoch werden häufig die Laborgeräte für die künstliche Bewitterung auf einen Freibewitterungsstandort in den USA kalibriert (Bauer 2000).

2.6.1.2 Umweltsimulation

Bei materialspezifischen Veränderungen während der Verwendung ist eine Abschätzung der Veränderung unumgänglich. Der steigende Erwartungsdruck hinsichtlich Produktqualität und kurzer Entwicklungszeiten führte zur Beschleunigung durch Simulation. Künstlich erzeugte Umweltbedingungen sollen die natürlichen Veränderungen nachstellen. Generelle Aussagen über den Beschleunigungsfaktor einer Simulation gegenüber den natürlichen Veränderungen können derzeit noch

nicht getroffen werden (Wypych 2003). Die Gegenüberstellung der Materialeigenschaften ist nicht nur am Ende einer Simulation nötig, sondern auch während der laufenden Untersuchung sind die Veränderungen entscheidend. Eine Unkenntnis des Veränderungsprozesses kann zu Fehlannahmen und -einschätzungen führen (Loidl 2006). Künstliches Bewittern oder Bestrahlen im Labor haben gegenüber Freibewitterung Vorteile, da unter gewissen Voraussetzungen der Beschleunigungsfaktor erhöht werden kann (Vogl 1999). Dazu müssen laut Wypych (2003) einige Faktoren für die Simulation natürlicher Veränderung beachtet werden: (1) höhere Intensitäten bei den künstlichen Umweltbedingungen, (2) Simulation mit unterschiedlichen Einflussfaktoren und Variation (3) Betrachtung nur relevanter Materialeigenschaften. Mit diesen Möglichkeiten sollte ein umfassendes Wissen über die Einflüsse und die Auswirkungen auf Materialien bei der Simulation erreicht werden.

Bei der Umweltsimulation existiert eine große Anzahl von Normen für die Prüfung unterschiedlicher Materialien. Für die Simulation wird der Begriff „künstliche Bewitterung“ verwendet und es werden dabei die Einflüsse der UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Temperatur simuliert. Durch ständige Weiterentwicklungen der Methoden zur Umweltsimulation sind eine Fülle von unterschiedlichen Gerätschaften und Strahlungslampen vorhanden. Vor allem bei den Lampentypen gibt es keine einheitliche Regelung, und die Fachwelt der Lampenhersteller und Prüflabore diskutiert über die unterschiedlichen Einsatzgebiete (Wypych 2003; Pietschmann et al. 2007; Vesey et al. 2007). Diese Problematik bei der Lichtbestrahlung von Holz griffen Tolvaj und Mitsui (2005) auf und untersuchten die Auswirkungen an der Holzoberfläche durch die Bestrahlung mit einer UV-Lampe, einem Xenonstrahler und durch Sonnenlicht.

2.6.2 Bewertung der Veränderungen oder Messung von Materialeigenschaften

Um Prozesse und Materialien miteinander zu vergleichen, sind Methoden für eine Beurteilung der Vergleichbarkeit einzusetzen. Bei visuellen Begutachtungen können keine Messwerte erhalten werden, sondern eine Kategorisierung. Es haben sich Verfahren mit standardisierten Bewertungsschlüsseln und Bildkatalogen etabliert, beispielsweise ÖNORM EN ISO 4628 (2004) für Bewertung von Beschichtungen. Die ÖNORM EN ISO 3668 (2001) ist ein Verfahren zum visuellen Vergleich der Farbe von Beschichtungen. Militzer et al. (2000) und Devantier et al. (1993) untersuchten die Möglichkeit einer Erstellung eines Anwenderkataloges für die Beurteilung von Farbabweichungen an Holzoberflächen nach der Dämpfung und der Veränderung durch Sonnenbestrahlung im Innen-

bereich. Bei der visuellen Beurteilung wird eine hohe Dauerleistung des Fachpersonals verlangt, dadurch können subjektive Fehlentscheidungen nicht ausgeschlossen werden, was zu Reklamationen und Mehrkosten führt (Reigbert 1998). Eine Verbesserung der Objektivität kann auf einer zahlenbasierten Analyse der Messergebnisse erreicht werden. Die Farbe kann automatisiert kontrolliert werden, was eine wirtschaftliche Bedeutung erkennen lässt. Einerseits haben sich Farberkennungssysteme für die Qualitätsbeurteilung oder Fehlererkennung in der Holzindustrie etabliert. Andererseits besteht weiteres Entwicklungspotential bei der Farbmessung von Holzoberflächen bezüglich der Empfindlichkeit automatisierter Systeme (Plinke 1999; Rinnhofer 2004). Die Unterscheidbarkeit von Farbdifferenzen spielt dabei eine wichtige Rolle.

Franke (1993) analysierte die Unterscheidungsempfindlichkeit des menschlichen Auges und des Farbabstandswertes ΔE^* (Abschnitt 3.2.5), ermittelt durch Farbmessungen an den Druckfarben im Papierbereich. Ab einem Farbabstand von 0,2 werden die Unterschiede für das menschliche Auge wahrnehmbar. An Holzoberflächen wird die Unterscheidbarkeit mit einem Farbabstand von 2,3 für das menschliche Auge sichtbar (Sandermann und Schlumbom 1962b). Diese Ergebnisse zeigen eine Übereinstimmung mit der menschlichen Wahrnehmung und die Einsetzbarkeit der Farbmessung an Holzoberflächen.

2.6.3 Mathematische Modelle

Im Rahmen der Modellbildung wird ein System als Modell abgebildet. Das Modell repräsentiert die Wirklichkeit oder nur einen Teil davon (Bockhorn 2007). Dabei wird das System als zweckorientierte abgegrenzte Realität angesehen, welche durch das Modell dieser reduzierten Wirklichkeit mittels Methoden beschrieben wird. Die Anwendung einer bestimmten Modellart ist vor allem von den Forschungsfragen und der Zielsetzung der Untersuchungen abhängig. Als Ausgangspunkt wird vor allem das Muster oder die Struktur der vorliegenden Daten untersucht (McCullagh und Nelder 1999).

Bei der Modellierung von Eigenschaftsveränderungen während unterschiedlicher Alterungsprozesse schlägt Brown (1995) regressionsanalytische Methoden vor. Mit Hilfe dieser Regressionsmodelle werden bei einfachen Problemstellungen Abhängigkeiten erkannt. Das einfachste Modell ist eine Gerade für lineare Zusammenhänge. Für nicht lineare Abhängigkeiten werden polynome, exponentielle, logarithmische Funktionen an die experimentellen Daten angepasst (Hamid und Amin 1995; Wypych 2003). Hamid und Amin (1995) analysierten generalisierte lineare Modelle (GLM) für die

Berechnung der Vorhersage der Lebensdauer von Kunststoffen und folgerten ein Polynom 2ter Ordnung als das beste Modell für die Beschreibung der Daten. Creemers et al. (2002) konnten durch ihre Untersuchungen über die Umwelteinflüsse auf beschichteten Holzoberflächen keine allgemeingültigen Zusammenhänge des Klimas und der Abbauprozesse errechnen.

Fahrmeir et al. (2007a) gehen von der Tatsache aus, dass in der Regel nicht jeder Datensatz durch parametrische Modelle dargestellt werden kann oder von einer großen Zahl von Parametern bestimmt ist, die einzeln nicht mehr sinnvoll interpretiert werden können. Eine flexible Modellierung des Einflusses metrischer Kovariablen auf die abhängigen Variablen kann durch nichtparametrische Regressionen ermöglicht werden. Cleveland (1979) veröffentlichte einen Vorschlag zur lokalen Schätzung der Glättungsparameter. Die Beobachtungen (Datensätze) in der Nachbarschaft für die Schätzung bekommen volles Gewicht, alle übrigen Beobachtungen werden ausgeschlossen. Dieser Vorschlag führte zur lokal gewichteten Regression (Loess, Locally Weighted Regression). Guseva und Lichtblau (2005) setzten die Loess-Methode für die Schätzung der Produktlebenszeit von Kunststoffen bei der Freibewitterung ein und modellierten die Zugfestigkeit der Polymere.

3 Material und Methoden

Der experimentelle Teil gliedert sich in mehrere Teiluntersuchungen, wobei die einzelnen Untersuchungen aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen nicht bei jeder der Holzarten Anwendung fanden.

3.1 Material

3.1.1 Probenmaterial für die Analyse der Messbereiche

Für die Untersuchung des Einflusses der Messbereiche wurden jeweils 10 Proben von Eschen- und Buchenholz mit einer Dimension von 360 x 20 x 20 mm (axial, radial, tangential) eingesetzt. Alle Proben waren fehlerfrei und frei von störenden Verfärbungen. Die gehobelten Probenoberflächen wiesen eine eindeutige Ausrichtung in radialer und tangentialer Schnittrichtung auf. Für jede Holzart wurden zwei Kategorien nach der Jahrringbreite eingeteilt. Diese Grenzwerte wurden frei definiert und waren abhängig von der vorhandenen Variation der Jahrringbreiten. Bei Buche war die Unterscheidungsgrenze 1,55 mm und bei Esche 2,55 mm.

3.1.2 Probenmaterial für die Darstellung der visuellen Farbwahrnehmung

Je eine Probe mit der Dimension 375 x 75 x 20 mm (Länge, Breite, Dicke) der Holzarten Eiche, Douglasie, Fichte, Lärche und Tanne wurde für die Darstellung der visuellen Farbempfindung verwendet.

3.1.3 Probenmaterial für Klassifizierung thermisch modifizierter Laubhölzer

Zwei kerngetrennte Bohlen von unterschiedlichen Eschen- und Buchenstämmen wurden verwendet. Als Referenzmuster wurde eine Bohle nicht behandelt und die zweite Bohle wurde einer thermischen Modifikation unterzogen. Bei Esche wurden zwei Behandlungsstufen verwendet und in leicht (160°C) und mittel (180°C) eingeteilt. Die Buchenbohlen wurden in drei unterschiedlichen Behandlungsstufen, leicht (180°C), mittel (200°C) und stark (220°C) eingestuft. Die unterschiedliche Bohlenanzahl kam durch die Auswahl des nach dem Vergütungsprozesses aussortierten Materials zustande, da Risse und Verwerfungen ein weiteres Ausformen der Proben unmöglich machten. Tabelle 3.1 zeigt eine Aufstellung zur Zusammensetzung des Probenkollektives sowie die Probenanzahl. Da es sich um Kernbohlen handelt, ist dies gleichzeitig die Anzahl der unterschiedlichen Baumstämme.

Tabelle 3.1: Anzahl der verwendeten Bohlen und Proben bei unterschiedlichen Behandlungsstufen

Holzarten	Behandlungsstufen			
	unbehandelt	leicht	mittel	stark
	Anzahl der Bohlen			
Buche	23	7	7	9
Esche	19	10	9	-
	Anzahl der Proben			
Buche	249	78	61	110
Esche	212	118	94	-

Die Probekörper wurden bei den unbehandelten und behandelten Bohlen aus der gleichen Position des Stammes herausgeschnitten (Abbildung 3.1). Die Probengröße war 360 x 20 x 20 mm (Länge, Breite, Höhe) und liessen eine Einteilung mit radialer und tangentialer Oberfläche zu. Für die Un-

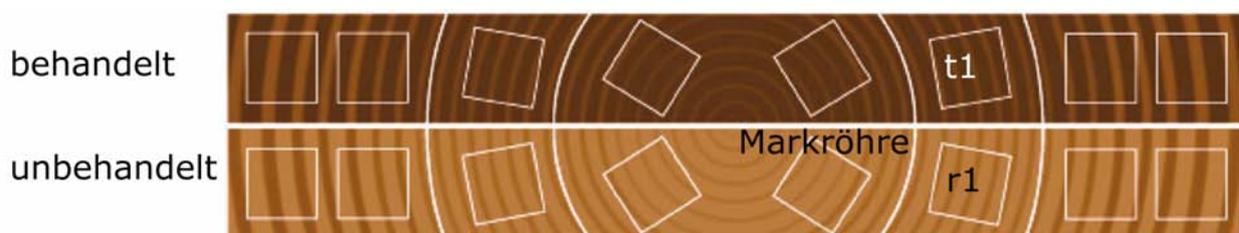


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Probenausformung aus den Kernbohlen (t1) behandelte Probe und (r1) Referenzprobe

tersuchung der Klassifizierbarkeit von Fichten- und Tannenholz sowie Lärchen- und Douglasienholz

wurden die Proben für die Untersuchung der Verfärbungen verwendet. Je Holzart wurden 48 Proben für die Untersuchung der Klassifizierbarkeit verwendet. Die Beschreibung ist im nachfolgenden Abschnitt zu finden.

3.1.4 Probenmaterial für die Untersuchung der Verfärbung

Abhängig von den unterschiedlichen Einsatzbereichen wurden verschiedene Holzarten und thermisch modifizierte Hölzer verwendet.

Im Innenbereich werden neben den heimischen Hölzern auch thermisch modifizierte Hölzer wegen des dunklen Farbtones eingesetzt. Diesem Umstand wurde in den Untersuchungen Rechnung getragen. Thermisch modifizierte Hölzer werden in einer Vielzahl von unterschiedlichen Behandlungsintensitäten und Holzarten am Markt angeboten. Die Proben wurden aus einer Fußbodenproduktion entnommen und wurden nach der Werksbezeichnung der Intensitäten in leicht und stark eingeteilt. Es standen keine Prozessparameter der Modifikation zur Verfügung. Nach dem Auftrennen der Bohlen oder Fußbodenlamellen wurden jene Proben mit störenden Holzmerkmalen und Verfärbungen aussortiert. Dies führte zu der in den Tabellen 3.2 und 3.3 dargestellten Probenanzahl und deren Eigenschaften. Die Rohdichte wurde nach der Lagerung im Normklima (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) bestimmt (Abschnitt 3.2.7.1).

Tabelle 3.2: Anzahl der verwendeten unbehandelten Bohlen, Proben und deren Eigenschaften

Holzarten	Anzahl der Bohlen	Anzahl der Proben	Rohdichte [g/cm ³]	mittlere Jahrring- breite [mm]
Buche	1	2	0,65...0,67...0,69	1,8...2,3...2,9
Douglasie	4	95	0,44...0,56...0,62	1,3...4,0...7,2
Eiche	5	95	0,53...0,62...0,71	0,9...2,7...4,6
Esche	1	2	0,63...0,66...0,70	1,9...2,4...2,8
Fichte	8	95	0,36...0,43...0,56	1,2...2,2...4,7
Lärche	8	95	0,44...0,56...0,76	0,9...2,0...4,4
Tanne	6	95	0,35...0,41...0,48	1,1...2,5...4,6

Die Probendimensionen für die Freibewitterung waren 375 x 100 x 20 mm (Länge, Breite, Dicke) und 375 x 76 x 20 mm. Dies entsprach den Anforderungen der DIN EN 927-3 (1998) und DIN EN 927-3 (2007). Die Dimensionen für die Auslegung in Florida (USA) waren 300 x 100 x 20 mm, da

nur solche Probengrößen für eine Freibewitterung zulässig waren.

Die Probendimensionen für die Umweltsimulationen waren 150 x 75 x 20 mm (Länge, Breite, Dicke) und entsprachen den Anforderungen der DIN EN 927-6 (2006).

Tabelle 3.3: Anzahl der verwendeten Bohlen und Proben sowie die Behandlungsstufen

	Probenanzahl der Behandlungsstufen mit Rohdichteangaben	
	leicht (g/cm ³)	stark (g/cm ³)
Edelkastanie	16 (0,42...0,43...0,45)	-
Esche	16 (0,66...0,67...0,68)	16 (0,49...0,52...0,55)

Die Dicke der Proben aus der Fußbodenproduktion war abweichend 5 mm.

3.2 Methoden

3.2.1 Sonnenbestrahlung hinter Glas

Die Auslegung der Proben erfolgte im Dezember 2004 an zwei unterschiedlichen Standorten. Der erste Probenhalter befand sich hinter einem Fenster mit 2-scheibigem Aufbau am Standort der Fachhochschule Salzburg GmbH in Kuchl und zeigte mit einer Neigung von 45° nach Süden. Der Zweite Standort war in Piding (47°46' nördliche Breite, 12°55' östliche Länge und 455 Seehöhe) hinter einem 3-scheibigen Fenster gleich ausgerichtet. Während am Standort Kuchl die Proben in Zeitabständen von 7, 28, 42, 72, 103, 185 und 366 Tagen begutachtet und die Farbe gemessen wurden, erfolgten bei den Proben am Standort Piding nur die Farbmessungen am Anfang der Prüfzeit und nach 366 Tagen.

3.2.2 Freibewitterung

Die Probenauslegung erfolgte auf den Bewitterungsständen (Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2: Standortumgebung und Probenanordnung auf den Freibewitterungsständen in Kuchl (links) und im Nationalpark Berchtesgaden (rechts)

Zwei verschiedene Probenausrichtungen wurden für die Auslegung der Proben in der Freibewitterung verwendet (Abbildung 3.3).

Die natürliche Alterung der fünf Holzarten (Douglasie, Eiche, Fichte, Lärche und Tanne) wurde an drei Standorten geprüft.

- Standort 1 Kuchl ($47^{\circ}37'$ nördliche Breite, $13^{\circ}08'$ östliche Länge und 450m Seehöhe)
- Standort 2 Nationalpark Berchetsgaden ($47^{\circ}35'$ nördliche Breite, $13^{\circ}13'$ östliche Länge und 1350m Seehöhe)
- Standort 3 Homestead in Florida (USA) ($25^{\circ}27'$ nördliche Breite und $80^{\circ}30'$ westliche Länge und 3m Seehöhe)



Abbildung 3.3: Darstellung der unterschiedlichen Versuchsanordnung der Proben in der Freibewitterung, links: quer zur Falllinie und rechts: parallel der Falllinie

In der Abbildung 3.4 sind die Monatsmittel der Temperatur und der rel. Luftfeuchte und die Monatssumme des Niederschlages abgebildet. Aufgrund technischer Schwierigkeiten und Wartungsarbeiten kam es zu Unterbrechungen bei der Aufnahme der Messdaten. Die Werte wurden aus unterschiedlichen Quellen bezogen. Für den Standort Kuchl wurden die Klimadaten von April 2006 bis September 2007 von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik sowie vom Amt der Salzburger Landesregierung aus dem Raum Salzburg zur Verfügung gestellt. Im Zeitraum September 2007 bis Oktober 2008 wurden die Klimadaten am Standort Kuchl mittels einer Wetterstation direkt am Standort der Freibewitterung erhoben. Alle Klimadaten für den Versuchsstandort 2 im Nationalpark Berchtesgaden stammen aus dem Nationalpark. Die Klimadaten von Homestead wurden von der Firma Q-Lab Florida erhoben.

Der Freibewitterungsversuch (1) dauerte von April 2006 bis April 2007 mit jeweils 5 Proben für jede Holzart an allen drei Standorten. Danach wurden 2 Proben im Normklima gelagert und die restlich 3 Proben wieder ausgelegt im Zeitraum Mai 2007 bis Mai 2008. Der Freibewitterungsversuch (2) erfolgte im Zeitraum Juni 2007 bis Juni 2008 an den Standorten Kuchl und Berchtesgaden. Von Oktober 2007 bis Oktober 2008 wurden Proben für den Freibewitterungsversuch (3) am Standort Kuchl ausgelegt.

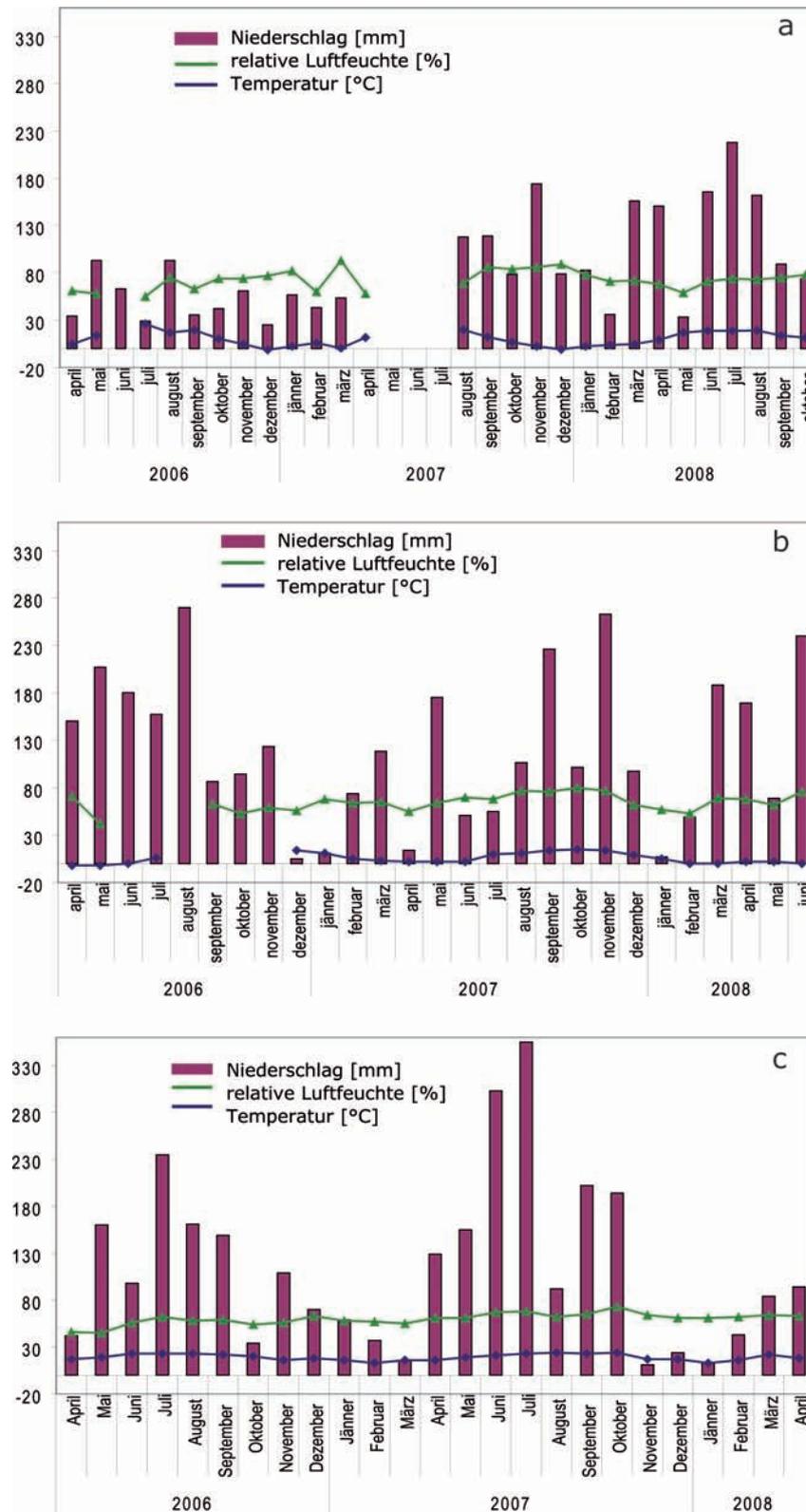


Abbildung 3.4: Darstellung ausgewählter Klimadaten an den drei Standorten a: Kuchl, b: Berchtesgaden, c: Homestead

3.2.3 Simulation von Umwelteinflüssen

Für die Simulationen wurden zwei unterschiedliche Prüfgeräte eingesetzt. Das Schnellbewitterungsgerät - Accelerated Weathering Tester QUV - der Firma Q-Panel Company und das Schnellbelichtungsprüfgerät - Xenon Suntest CPS+ - der Firma Atlas Material Testing Technology.

Wypych (2003) fasst die Fülle von Vorschriften, Richtlinien und Normen über die Umweltsimulation im Labormaßstab zusammen, dabei können über 30 verschiedene künstliche Bewitterungsverfahren unterschieden werden. Podgorski et al. (2003) verglichen 7 verschiedene Verfahren für die künstliche Bewitterung von beschichteten Holzoberflächen. Aus dieser Auswahl wurde eine Auswahl der technisch machbaren Simulationsvarianten für diese Arbeit definiert. Als Richtlinie diente die Norm EN ISO 11507 (2001) für die Beständigkeitsprüfung von Beschichtungen im Außenbereich. Es werden 3 Fluoreszenz-Lampentypen empfohlen, diese unterscheiden sich in ihrem Emissionsbereich (Abbildung 3.5). Diese Lampen emittieren nur UV-Licht und stimmen nicht mit

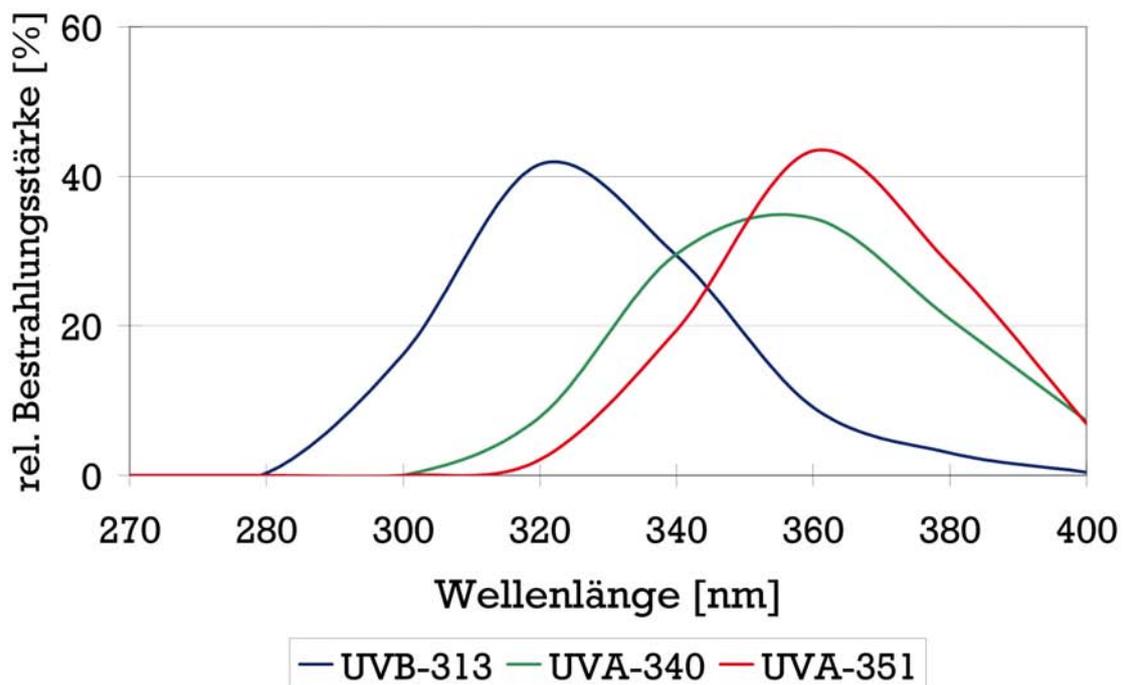


Abbildung 3.5: Lichtartenvergleich der verwendeten UV-Fluoreszenzlampen nach EN ISO 11507 (2001). Die spektrale Bestrahlungsstärke zwischen 290 und 400 nm ist als 100 % definiert

der Spektralverteilung des Sonnenlichtes überein. Um diesem Umstand gerecht zu werden, wurden Xenonbogenstrahler mit entsprechenden Filtergläsern von den Herstellern entwickelt, womit eine gute Anpassung an das Sonnenlicht gegeben ist.

Die Simulation der Umwelteinflüsse wurde in drei Schwerpunkte unterteilt und zwar die Untersuchung der Simulation der Auswirkungen durch Sonnenlicht, Niederschlag und diejenigen durch Säureeinwirkung (Tabelle 3.4).

Für die erste Versuchsreihe (1) wurden neben dem Lampentypen UVA-340 (0,77 [W/m²/nm]) noch zwei andere Lampentypen (UVB-313 (0,63 [W/m²/nm] und UVA-351 (0,77 [W/m²/nm]) eingesetzt. Die Bestrahlungsstärke hat Einfluss auf die Temperatur, diese wurde mit 60° definiert. Deshalb musste die Bestrahlungsstärke für den jeweiligen Lampentyp berücksichtigt werden. Bei Fluoreszenz-Lampen wird die Bestrahlungsstärke in W/m²/nm angegeben und bezieht sie auf eine Wellenlänge (Wypych 2003), beispielsweise bei UVA-340 Lampen auf die Wellenlänge 340nm.

Tabelle 3.4: Beschreibung der Umweltsimulationsprozesse

Nummer	Beschreibung	Einstellungen			
		Lampentyp	Strahlungsstärke	Temperatur	Zeitdauer
1	UV-Bestrahlung, Kondensation	UVA-313	0,63 [W/m ² /nm]	60°C	96 [h]
	UV-Bestrahlung, Kondensation	UVA-340	0,77 [W/m ² /nm]	60°C	96 [h]
	UV-Bestrahlung, Kondensation	UVA-351	0,77 [W/m ² /nm]	60°C	96 [h]
2	UV-Bestrahlung	UVA-340	1,00 [W/m ² /nm]	60°C	300 [h]
3	Xenon-Bestrahlung	Xenonlampe	765 [W/m ²]	60°C	126 [h]
4	UV-Bestrahlung, Kondensation	UVA-340	1,00 [W/m ² /nm]	60°C	432 [h]
5	UV-Bestrahlung, Wassersprühung	UVA-340	1,00 [W/m ² /nm]	60°C	504 [h]
6	UV-Bestrahlung, verdünnte HNO ₃	UVA-340	1,00 [W/m ² /nm]	60°C	504 [h]
7	UV-Bestrahlung, Wassersprühung	UVA-340	0,89 [W/m ² /nm]	60°C	1661 [h]

Die Angaben der Temperatur in Tabelle 3.4 beziehen sich auf die Schwarzplattentemperatur. Die zur Verfügung stehenden Kurzzeit-Bewitterungsgeräte haben keine Regelung der rel. Luftfeuchte in der Prüfkammer. Um diesem Umstand gerecht zu werden, erfolgte eine zweistündige Kondensationsphase nach 48 Stunden Bestrahlung bei der Umweltsimulation 1.

Die zweite und dritte Versuchsreihe wurden ohne Kondensationsphasen durchgeführt. Die einzelnen Zyklen der Simulationsversuche 4, 5, 6 und 7 sind in den Tabellen 3.5 und 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.5: Beschreibung der Zyklen der Umweltsimulation (Versuche 4-6)

Schritte	Beschreibung	Zeitdauer [h]
1	Kondensation mit Wasser	24
2	Bestrahlung mit UVA-340 Lampen	5
3	Wasserbesprühung 6-8 Liter/min	1

Bei der vierten Versuchsreihe wurden nur die Zyklen der Kondensation eingehalten, die übrige Zeit wurden die Proben mit UV-Licht bestrahlt. Die Simulation 5 wurde mit verdünnter Salpetersäure statt der Wassersprühung durchgeführt. Stickoxide sind in der Luft vorhanden und konnten auch im Regenwasser nachgewiesen werden (Frevert und Klemm 1984). Durch die Verwendung der Säure wurde der pH-Wert von 5,3 auf 3,0 gesenkt.

Tabelle 3.6: Beschreibung der Zyklen der Umweltsimulation (Versuch 7)

Schritte	Beschreibung	Zeitdauer [h]
1	Kondensation mit Wasser	24
2	Bestrahlung mit UVA-340 Lampen	2,5
3	Wasserbesprühung 6-8 Liter/min	0,5

Bei der letzten Versuchsreihe 7 wurden die Zeitdauern der einzelnen Schritte (2 und 3) verändert, die Bestrahlung wurde auf 2,5 Stunden und die Wasserbesprühung auf 0,5 Stunden verringert (Tabelle 3.6). Die Simulation 7 wurde in Anlehnung an die im Oktober 2006 herausgegebene gültige Norm EN 927-6 durchgeführt.

3.2.4 Visuelle Beurteilungen

Die Beurteilung mit bloßem Auge ist für die Einstufung der visuellen Wahrnehmbarkeit der Veränderungen an der Materialoberfläche sinnvoll. Für eine quantitative Bestimmung der Veränderungen wurde ein optisches Messsystem eingesetzt (vgl. Abschnitt 3.2.5).

3.2.4.1 Kategorisierung der Veränderungen

Die Rissbeurteilung wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 4628-4 (2003) durchgeführt. Dabei wurden die Risse in Rissarten (Breite) visuell in 5 Kategorien eingeteilt (Tabelle 3.7). Die Einteilung erfolgte nach der ersten Erkennbarkeit von Rissen bei einer Probe.

Tabelle 3.7: Rissbeurteilung der bewitterten Proben

Bewertungszahl	visuelle Beurteilung
0	mit bloßem Auge nicht sichtbare Risse
1	mit bloßem Auge gerade sichtbare Risse
2	mit bloßem Auge deutlich sichtbare Risse
3	große Risse, bis zu 1 mm breit
4	sehr große Risse, über 1 mm breit

3.2.4.2 Quantitative Bestimmung der Veränderungen

Für eine quantitative Evaluierung der Risse wurden diese mit einem Stereoauflichtmikroskop (Nikon) mit 10-facher Vergrößerung vermessen. Die kleinste messbare Strecke der Rissbreite und Risslänge war $100\ \mu\text{m}$. Durch eine zeitlich unterschiedliche Messung konnten Veränderungen der Risse quantifiziert werden. In Anbetracht der großen Untersuchungsfläche und der notwendigen mikroskopischen Auflösung wurde die Rissvermessung mit der Annahme eines zufälligen Ereignisses der Rissentstehung nur kleinflächig durchgeführt. Dazu wurde eine Maske mit diagonal über die Fläche laufenden, vordefinierten Feldern mit den Abmessungen $20 \times 20\ \text{mm}$ angefertigt. Je nach Probengröße wurde die Anzahl der Beobachtungsbereiche variiert, damit wurde ein gleichbleibender Anteil von 20 % an der gesamten bewitterten Fläche erzielt. Laut Wolf (2006) ist die Sinnhaftigkeit kleinflächiger Analysen der Rissbildung von künstlich bewitterten Proben gegeben.

3.2.4.3 Dokumentation visueller Veränderungen der Holzoberfläche

Für die Erstellung von Bildern zur Dokumentation der farblichen Veränderungen wurden ein Flachbettscanner (Epson GT-10000+) und Digitalkamera Cybershot (Sony) und Canon Digital IXUS verwendet.

3.2.5 Bestimmung der Holzfarbe

Alle durch Farbmessung bestimmten Farbwerte beziehen sich auf das CIE $L^*a^*b^*$ Farbsystem. Die einzelnen Farb- und Helligkeitswerte werden in ihre Bestandteile zerlegt und zahlenmäßig dargestellt (Abbildung 3.6). Die Koordinate L^* bezeichnet dabei die Helligkeit der gemessenen Oberfläche und kann Werte von 0 (schwarz) bis 100 (ideal weiß) annehmen. Mit a^* wird der Rot-/Grünanteil angegeben und b^* beziffert den Gelb-/Blauanteil der Farbe. Der Farbabweichungsmaß ΔE^* er-

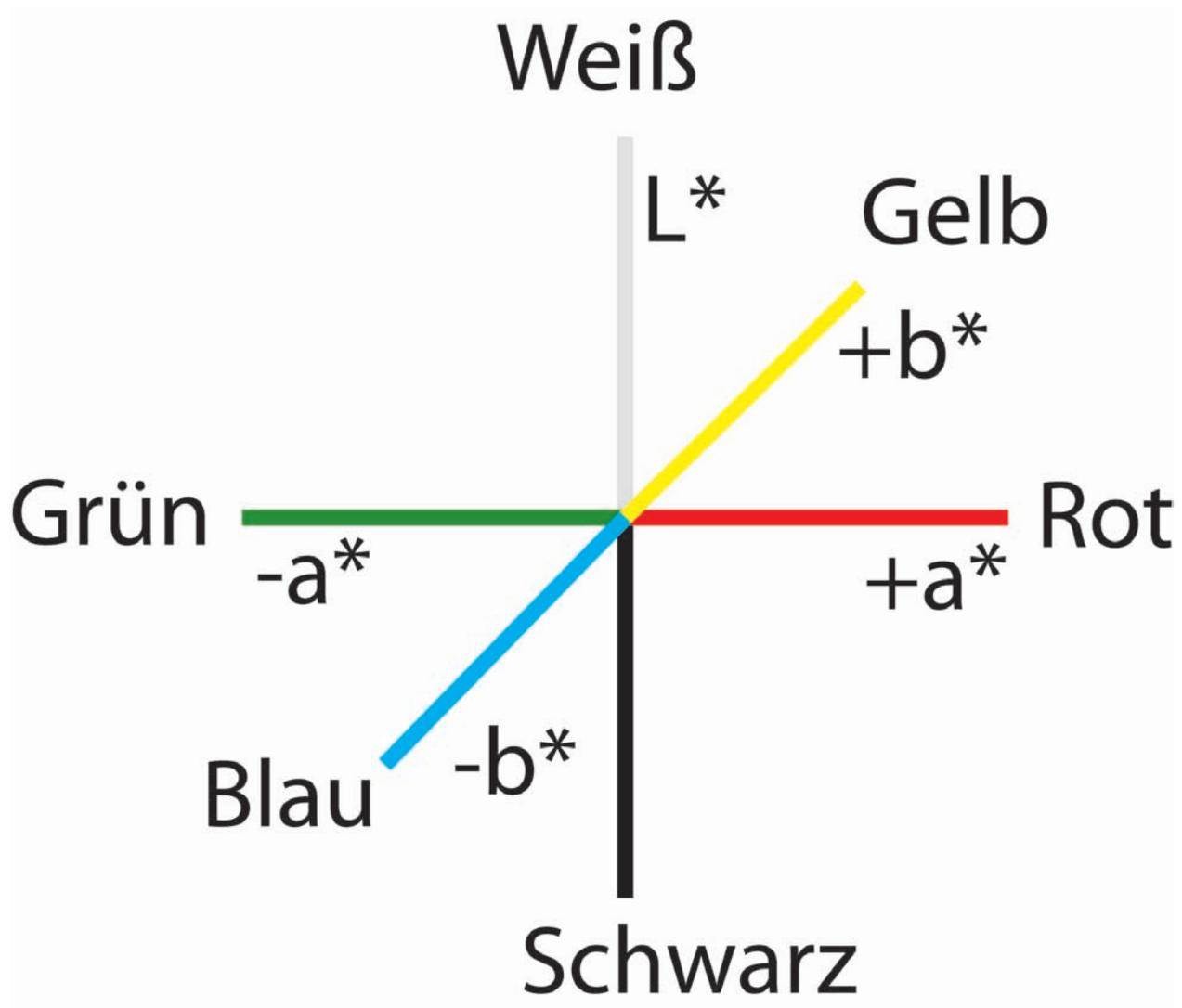


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des CIE- $L^*a^*b^*$ Farbsystems

rechnet sich aus den Differenzen der L^* , a^* und b^* Werte zweier Farben und wird entsprechend der Formel (3.1) berechnet. Dabei handelt es sich nur um den Betrag der Farbabweichung, der keine

Aussagen über die Richtung der Veränderung und einzelner Farbwerte liefert.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3.1)$$

Somit können unterschiedliche Farbänderungen die gleichen Farbabstände (ΔE^*) aufweisen, jedoch sich einzelne Farbwerte unterschiedlich verändern, und dadurch ist die Farbwahrnehmung sehr verschieden.

Dokumentation des Farbänderungsprozesses bei der Freibewitterung

Für die kontinuierliche Dokumentation der Farbänderung des Holzes bei der Verwitterung wurden die Farbmessungen mit einem Spektrometer (Mercury 2000 der Firma Datacolor) mit einer Messgeometrie $d/0^\circ$ durchgeführt. Es wurden der 10° Normalbeobachter und die Lichtquelle D_{65} als Standardeinstellungen verwendet. Bei den Messungen liegt die Probenoberfläche direkt an der Öffnung der Ulbrichtschen Kugel, ein Eindringen von Fremdlicht wird verhindert und die Beleuchtung der Oberfläche erfolgt diffus. Als Messfleckgrößen standen zwei Durchmesser von 2,5 und 11 mm zur Verfügung und wurden bei den Versuchen eingesetzt. Abbildung 3.7 zeigt die Messvorrichtung, die für die Farbmessung entworfen und verwendet wurde. Durch sie konnte eine genaue Positionierung des Messgerätes erfolgen und sie garantierte ein Wiederauffinden des Messflecks. Je nach Probengöße wurde die Anzahl der Messungen variiert und diese lagen zwischen jeweils 9 und 16 Messungen an einer Probe.

3.2.6 Durchführung des Vergleiches der visuellen Farbempfindung und den Messwerten

Es erfolgte eine Einteilung der Proben (Abschnitt 3.1.2) in 26 mm breite Abschnitte in der Längsrichtung. In jedem Abschnitt wurde die Farbe an 3 Messpunkten mit einer Messgröße von 11 mm Durchmesser bestimmt und danach wurde der erste Abschnitt mit einer Tischkreissäge (4,5 mm Schnittbreite) abgetrennt. Die abgetrennten Bereiche wurden in Alufolie gewickelt und bei Dunkelheit und Raumtemperatur gelagert. Die restliche Proben wurden nach DIN EN 927-3 im Außenbereich ausgelegt. Abweichend von der Norm wurde die Probe an einer Seite mittels handelsüblicher

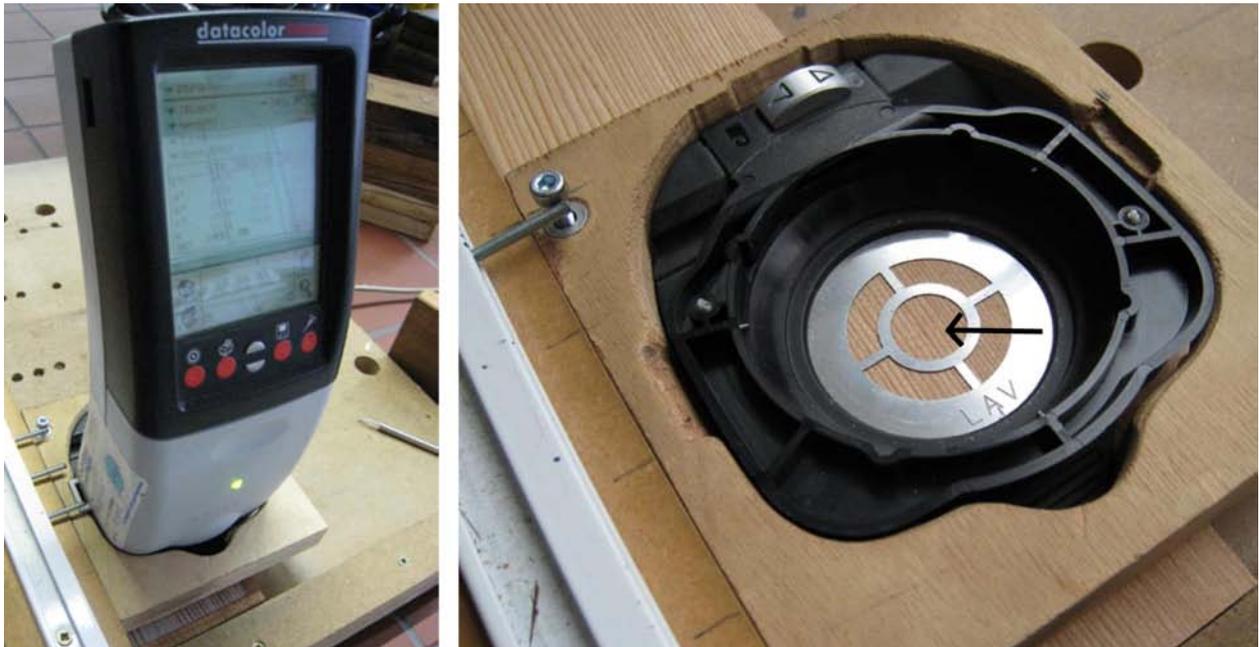


Abbildung 3.7: Messvorrichtung für die Farbmessung mit Messgerät (links), Detail der Messblende (Pfeil) und der Versuchsanordnung (rechts)

Schraube befestigt. Diese Befestigung beeinträchtigte die Analyse nicht. Nach definierten Zeitperioden von 1, 2, 3, 4, 7, 15 und 29 Tagen erfolgte die Farbmessung an den Holzproben und ein Abtrennen des jeweils nächsten Abschnittes. Die in Alufolie gewickelte Probe wurde bei den anderen Proben aufbewahrt. Die Lagerdauer betrug längstens 29 Tage.

Die Proben wurden am 25. August 2008 am Standort Kuchl ausgelegt.

3.2.7 Bestimmung einiger wichtiger holztechnologischer Kenndaten

Holztechnologische Kenndaten weisen für viele Materialeigenschaften eine entscheidende Rolle auf, weshalb Rohdichte und Feuchte bestimmt wurden.

3.2.7.1 Rohdichte (r_u)

Die Rohdichte von Holz r_u ist der Quotient aus der Masse m_u und dem Volumen V_u des Holzes. Nach der Erreichung der Massenkonstanz bei Normklima (20°C und 65% rel. Luftfeuchte) erfolgte die Bestimmung der Rohdichte nach der DIN 52182 (1975).

3.2.7.2 Holzfeuchte (u)

Bei den Umweltsimulationen erfolgte die Bestimmung der Holzfeuchte in Anlehnung an die DIN 52 183 (1977). Dabei wurde eine zusätzliche Probe für die Bestimmung der Holzfeuchte bei den Simulationsversuchen verwendet. Bei den Zeitpunkten der Farbmessung wurde die Holzfeuchte mittels Schichtprobe über den Probenquerschnitt bestimmt.

Bei den Freibewitterungsproben wurde ein kapazitives Holzfeuchtemessgerät (Merlin PM-1) für die zerströrungsfreie Messung eingesetzt.

3.2.8 Datenanalyse

In Abhängigkeit der Fragestellung wurden unterschiedliche mathematische Computerprogramme und analytische Methoden eingesetzt. Die statistische Auswertung der erhobenen Messwerte erfolgte mit SPSS ®. Für die Modellierung der Farbwerte wurde die Software Mathcad ® eingesetzt.

Bei der Analyse wird versucht, die Struktur in den Daten zu untersuchen, um etwaige Streuungen erklären zu können.

3.2.8.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik wurde für die Darstellung der Datenmenge verwendet. Neben den Streudiagrammen wurde auch das Box-plot- oder Wiskers-Diagramm eingesetzt. In der Fachliteratur gibt es unterschiedliche Definitionen von einem Box-plot-Diagramm. Das verwendete Statistikprogramm verwendete die erklärte Darstellung (Abbildung 3.8).

x_{min} : Stellt den Minimalwert der Datenmenge dar, jedoch nur innerhalb des 1,5-fachen Quartilsabstandes.

$x_{0,25}$: Stellt das 25%-Quantil dar und ist die Merkmalsausprägung mit der Eigenschaft, dass 25% der statistischen Masse einen Wert kleiner oder gleich $x_{0,25}$ haben.

Median: Wird auch Zentralwert genannt. Der Median ist der mittlere Wert der nach der Messgröße geordneten Reihe der Daten.

$x_{0,75}$: Stellt das 75%-Quantil dar und ist die Merkmalsausprägung mit der Eigenschaft, dass 75% der statistischen Masse einen Wert größer oder gleich $x_{0,75}$ haben.

Quartilsabstand: Ist die Differenz zwischen dem 75%-Quantil und dem 25%-Quantil.

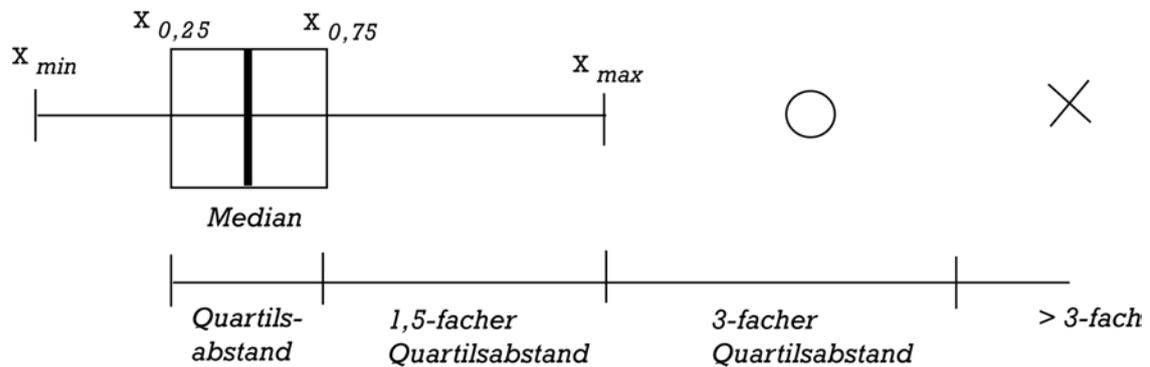


Abbildung 3.8: Erklärung der eingesetzten Box-plot Darstellung

x_{max} : Stellt den Maximalwert der Datenmenge dar, jedoch nur innerhalb des 1,5-fachen Quartilsabstandes.

O: Symbolisiert die Ausreißer. Dies sind Werte, die sich innerhalb des 3-fachen Quartilsabstandes befinden.

X: Stellt die Extremwerte dar. Dies sind Werte, die sich außerhalb des 3-fachen Quartilsabstandes befinden.

3.2.8.2 Test auf Normalverteilung

Der Test auf Normalverteilung ist wichtig, da viele statistische Methoden eine Normalverteilung voraussetzen. Für stetige Merkmale eignet sich der Kolmogoroff-Smirnov-Test (Hartung et al. 2002; Fahrmeir et al. 2007b). Als Prüfgröße wird der Abstand zwischen hypothetischer (Normalverteilung) und empirischer Verteilungsfunktion verwendet. Bei nicht normalverteilten Daten sind nicht-parametrische Methoden für das Testen der Nullhypothesen zu verwenden.

3.2.8.3 Mann Whitney U-Test

Mit diesem parameterfreien oder verteilungsfreien Test können Stichprobengruppen unterschiedlicher Verteilungen untersucht werden (Hartung et al. 2002). Dieser Test benutzt nicht die Beobachtungswerte selbst, sondern nur die den beiden Messdaten gemeinsam zugeordneten Rangplätzen. Die Summe der Ränge der einzelnen Stichprobengruppe wird in die Prüfgröße U umgerechnet.

Der kleinere der beiden U-Werte der jeweiligen Messreihe gilt als Prüfgröße. Ist dieser Wert kleiner oder gleich einem vom Stichprobenumfang abhängigen kritischen Wert, ist die Nullhypothese abzulehnen. Damit liegt ein statistischer Unterschied zwischen den Stichprobengruppen und dem gewählten Signifikanzniveau vor.

3.2.8.4 Varianzanalyse

Die Varianzanalyse ist eine Methode für die Beurteilung von Unterschieden in den Erwartungswerten einer normalverteilten Zufallsvariablen in mehreren Gruppen. Anhand der Prüfgröße wird getestet, ob die Variabilität zwischen den Gruppen größer als innerhalb der Gruppen ist (Fahrmeir et al. 2007b). Der statistische Test liefert eine Entscheidung darüber ob die beobachteten Unterschiede in den Mittelwerten der einzelnen Gruppen ausreichend groß sind, um davon auf Unterschiede in den zugehörigen Grundgesamtheiten schließen zu können.

3.2.8.5 Clustermethode

Die Clusteranalyse ist ein Instrumentarium zum Erkennen von Strukturen in einer Menge von Objekten, sie gehört zu den Methoden der multivariaten Statistik. Wird unterstellt, dass eine Menge von n interessierenden Objekten derart strukturiert ist, dass sie in mehrere Klassen (Gruppen, Cluster) zerfällt, so lassen sich mittels der Clusteranalyse diese Klassen festlegen (Hartung und Elpelt 1999). Die Klassenzugehörigkeiten der Objekte sollen dabei natürlich wesentlich durch den Grad der „Ähnlichkeit“ der Objekte festgelegt werden: Objekte, die zu einer Klasse gehören, sollen sich ähnlich sein (Homogenität innerhalb der Klasse) und die verschiedenen Klassen sollen möglichst unterschiedliche Objekte enthalten (Heterogenität zwischen den Klassen) (Backhaus et al. 2006). Als Unterscheidungsmerkmal kann die Distanz (z. B. quadrierte Euklidische Distanz) von metrischen Messgrößen zwischen den Objekten verwendet werden. Die Single-Linkage „nächstgelegener Nachbar“ Methode hat sich bei vielen Fragestellungen bewährt und gruppiert die Objekte mit der kleinsten Distanz zwischen einander (Hartung und Elpelt 1999).

3.2.8.6 Nichtparametrische Regression

Durch die Datenanalysen mittels Regressionen sollen Eigenschaften einer Zielvariable y in Abhängigkeit von Kovariablen x_1, \dots, x_n beschrieben werden. Bei nichtparametrischen Regressionen ist die flexible Modellierung des Einflusses metrischer Kovariablen auf die abhängige Variable das Ziel (Fahrmeir et al. 2007a).

Sich zeitlich verändernde Strukturen können nicht ohne weiteres durch globale Regessionsmethoden der Zeitreihenanalysen berücksichtigt werden. Flexibler sind lokale Ansätze der mathematischen Untersuchungen. Die Prinzipien von lokalen Regessionsansätzen lassen sich durch gleitende Fenster und Spline-Glätter skizzieren (Fahrmeir et al. 2007b). Die Grundidee ist, den Trend durch die Glättung der Zeitreihe zu ermitteln und anstelle eines globalen Modells werden mehrere, lokal definierte Polynome geschätzt. Jedoch ergeben die einzelnen Intervalle der geschätzten Polynome keine glatte Funktion. Die Einführung zusätzlicher Glattheitsbedinungen führten zur Klasse der Polynom-Splines (Fahrmeir et al. 2007a). Für ein Polynom vom Grad l der resultierenden Funktion wird eine $(l-1)$ -mal stetig differenzierbare Intervallsgrenze gefordert.

Eine zur Glättung von Zeitreihen häufig verwendete Methode ist die Bildung des gleitenden Durchschnittes, wodurch zufällige Schwankungen geglättet werden (Fahrmeir et al. 2007b). Bei lokal polynomial Regressionen bekommen die Daten in der Nachbarschaft für die Schätzung volles Gewicht, während die übrigen Beobachtungen vollständig ausgeschlossen werden. Dies führt zu einem Vorschlag des Loess (Locally weighted regression) Algorithmus von Cleveland (1979).

Die Berechnung der Konfidenzintervalle um die Loess modellierte Kurve erfolgte nach den Arbeiten von Jacoby (2000) und Guseva und Lichtblau (2005).

3.2.9 Bilderzeugung

Für die Erzeugung der computerunterstützten Bilder wurde Adobe Photoshoph ©CS2, Autodesk ©3 D Studio Max 9 und Autodesk ©AutoCAD Mechanical verwendet.

Eine digitale Fotoaufnahme einer unbewitterten Holzoberfläche diente jeweils als Grundlage für die Bilderzeugung. Die Bildfarbe wurde anhand der modellierten Farbwerte mit Photoshop verändert. Infolgedessen konnte die farbliche Veränderung einer Holzoberfläche immer mit den gleichen Holzmerkmalen und vergleichbaren Bedinungen dargestellt werden.

Diese modifizierten Bilder wurden für die computerunterstützte Bilderzeugung in das 3 D Studio

Max Programm implementiert. Eine mit dem AutoCAD erzeugte 3D-Darstellung einer Fassaden-schalung diente als Ausgangspunkt. Bei der Zuordnung der Materialeigenschaften wurde das mit Photoshop bearbeitete Bild verwendet.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einfluss des Messbereiches der Farbmessung an Holzoberflächen

Ausgehend von den eingesetzten Farbmessgeräten zur Bestimmung der Holzfarbe und deren Veränderung bei verschiedenen Prozessen, wurden mögliche Einflüsse auf das Messergebnis untersucht. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nach Holzart und Farbparameter einzeln dargestellt.

4.1.1 Einfluss der Messfläche

Für den Einfluss der unterschiedlichen Messbereiche wurden die Farbwertdifferenzen (Farbwert 11mm - Farbwert 2,5mm) zwischen den beiden Durchmessern (2,5 und 11 mm) für alle drei Farbparameter sowie für radiale und tangentielle Oberfläche berechnet. Dadurch standen 80 Differenzwerte zur Verfügung. Die Verteilung der errechneten Daten für Buche ist in Abbildung 4.1 und für Esche in Abbildung 4.2 ersichtlich.

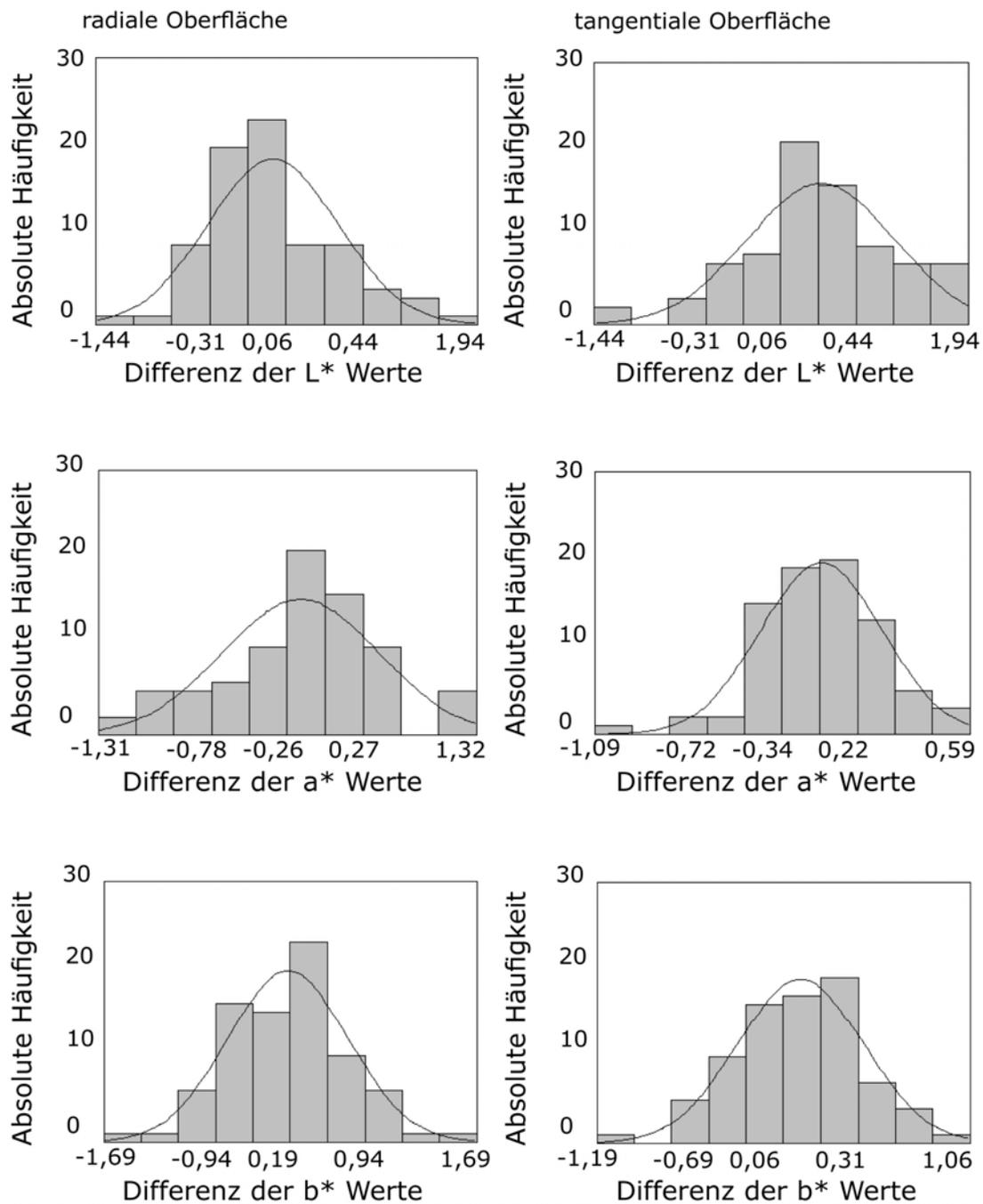


Abbildung 4.1: Häufigkeiten und Normalverteilungskurve der Farbparameterdifferenzen beider Durchmesser von 2,5 und 11 mm von radialer und tangentialer Oberfläche von Buchenholz

Die gemessenen Farbwerte sind abhängig vom eingesetzten Durchmesser, jedoch verteilen sich die beobachteten Differenzen annähernd normalverteilt. Einzelne Differenzen der Messwerte zwischen der Verwendung der zwei unterschiedlichen Messfleckgrößen sind deutlich. Jedoch gleichen sich

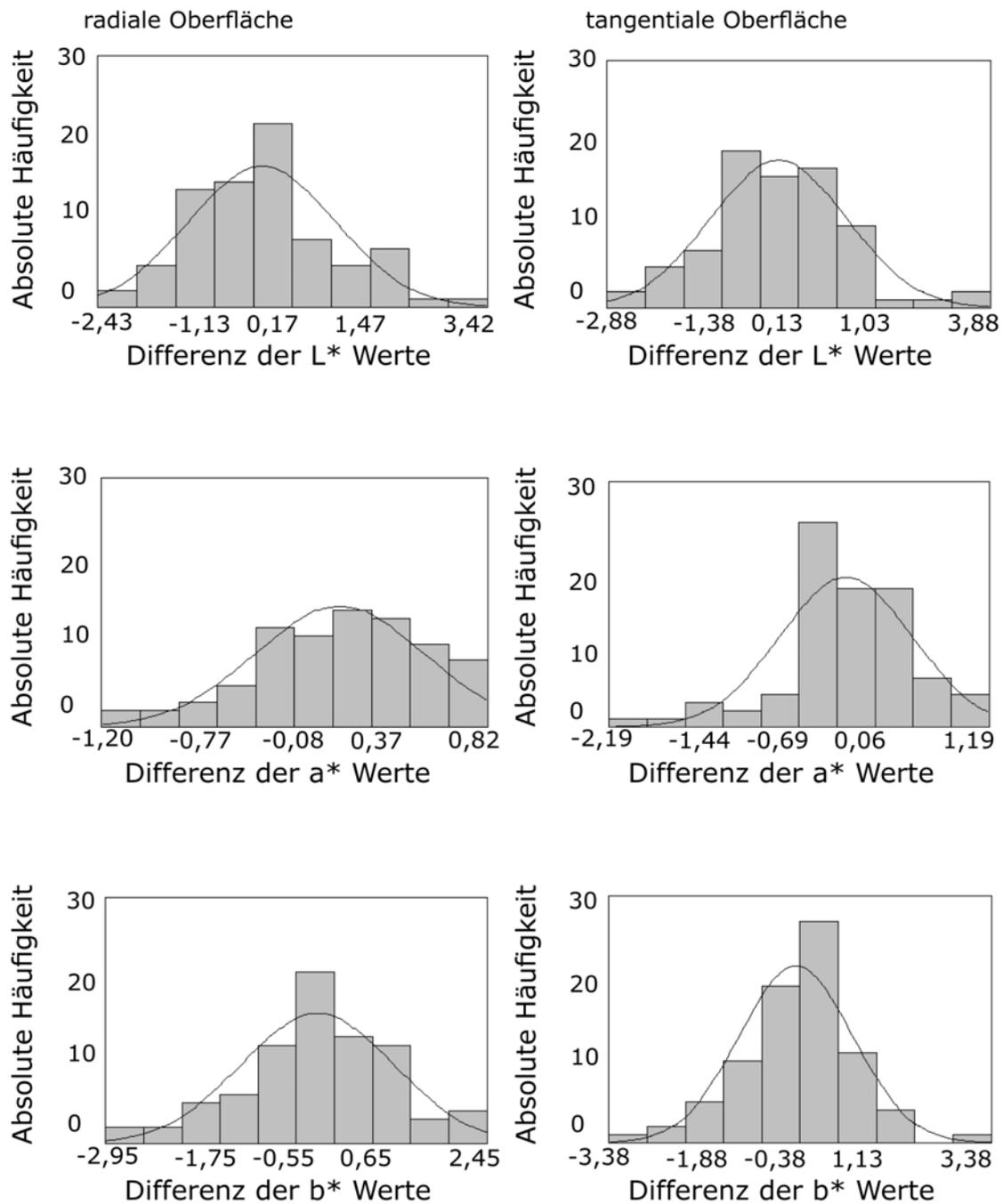


Abbildung 4.2: Häufigkeiten und Normalverteilungskurve der Farbparameterdifferenzen beider Durchmesser von 2,5 und 11 mm von radialer und tangentialer Oberfläche von Eschenholz

Differenzen mit größerer Probenanzahl und Messungen aus und im Mittel sind die Messwerte bei der Durchmesser vergleichbar, infolge der Zahlenwerte der absoluten Häufigkeit um den Nullpunkt verteilt.

An der radialen Oberfläche werden mit den zwei verwendeten Durchmessern mehrere Jahrringe gleichzeitig gemessen. Die Farbwerte enthalten einen Mittelwert des Früh- und Spätholzanteils der Jahrringe, eine Homogenisierung der Farbwerte wird erreicht (Abbildung 4.4). An der tangentialen Seite der Proben können die Übergangsbereiche der Jahrringe größer ausfallen, je nach Jahrringverlauf. Dadurch ist es möglich, Früh- oder Spätholzanteile sowie deren Übergang zu messen. Bei der Betrachtung der Differenzen ist diese Möglichkeit von geringer Bedeutung, da die Messung des kleinen sowie des großen Durchmesser in die selben Bereiche fällt.

Der U-Test von Mann Whitney bestimmte keine statistisch signifikanten Unterschiede bei der Verwendung beider Messbereiche, somit muss die Nullhypothese auf Gleichheit der Farbwerte angenommen werden. Mit beiden Messflächen konnten vergleichbare Farbwerte für die radiale und tangentiale Holzoberfläche erreicht werden. Durch die Ergebnisse der Analyse wurde der Messbereich mit dem Durchmesser von 11 mm für die weiteren Untersuchungen festgelegt.

4.1.2 Auswirkungen der radialen und tangentialen Oberfläche

Bei der Betrachtung eines Brettes oder einer Bohle können unterschiedliche Oberflächenorientierungen wahrgenommen werden (Abbildung 4.3).

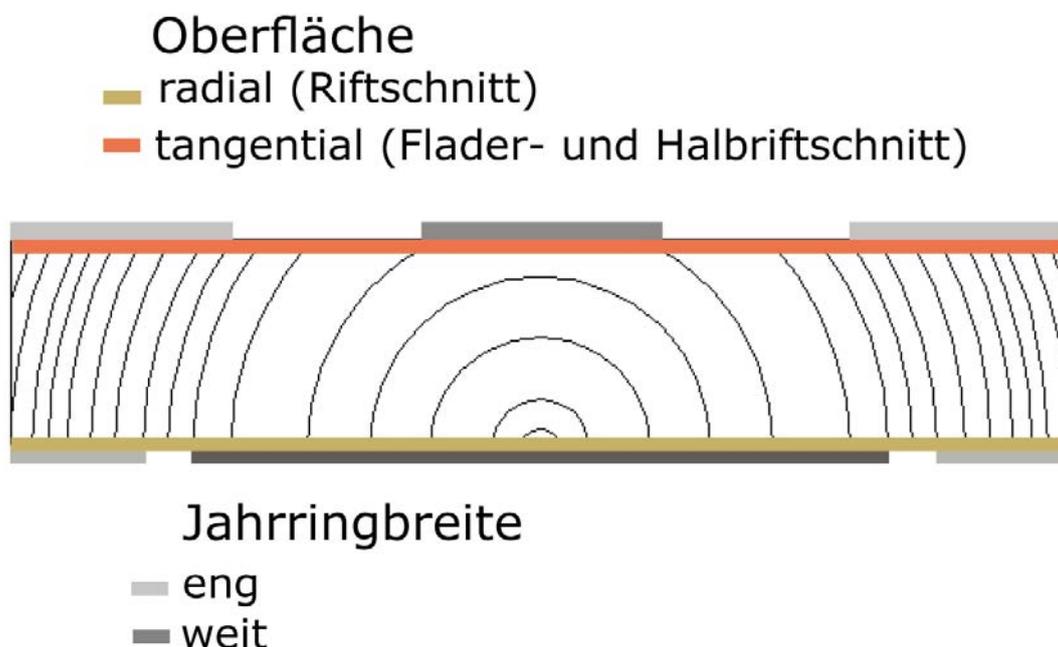


Abbildung 4.3: Mögliche Oberflächen und Jahrringbreiten auf einer Brettoberfläche

Eine Aufteilung nach Sektoren der radialen und tangentialen Flächen ist möglich. Generell nimmt die Jahrringbreite mit steigendem Alter der Bäume ab. Bei einer Sortierung von Brettern spielt die Ausrichtung und Breite der Jahrringe eine entscheidende Rolle. Da die Holzfarbe auf der radialen und der tangentialen Oberfläche unterschiedlich ist, werden auftretende Holzmerkmale anders interpretiert und dies kann zu einer falschen Beurteilung der Merkmale führen.

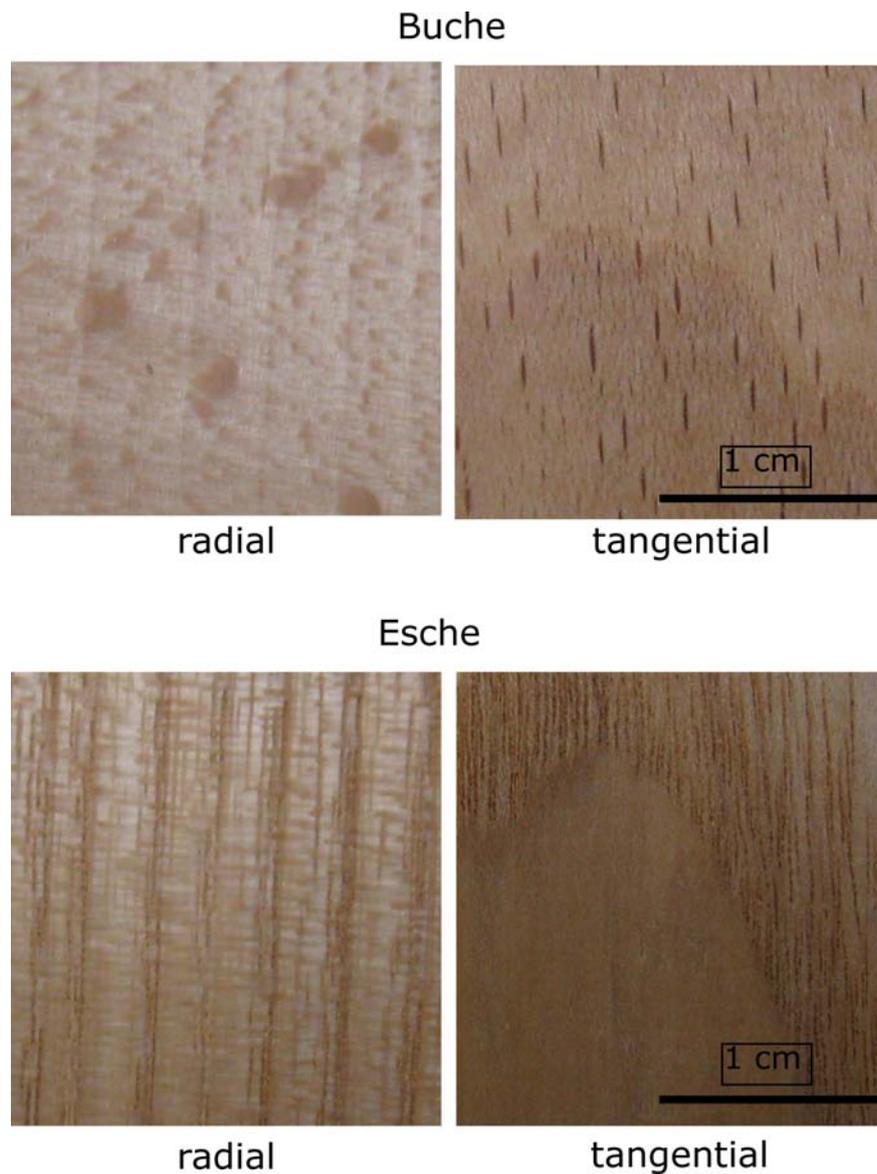


Abbildung 4.4: Visueller Vergleich von radialer und tangentialer Oberfläche von Buche und Esche

Die nähere Betrachtung der Holzoberfläche zeigte die unterschiedliche Ausrichtung der Zelltypen (etwa längs oder quer). Folglich wird kein einheitliches Oberflächenbild der radialen und tangentialen Oberfläche mit dem Auge wahrgenommen werden (Abbildung 4.4).

Die Darstellung der Datenverteilung gibt einen Überblick über deren Homogenität. Die Messwerte des L^* Parameter mit einem 11 mm großen Messdurchmesser sind in der Abbildung 4.5 für Esche und in der Abbildung 4.6 für Buche dargestellt, nach Schnittrichtung und kategorisierter Jahrringbreite aufgeteilt.

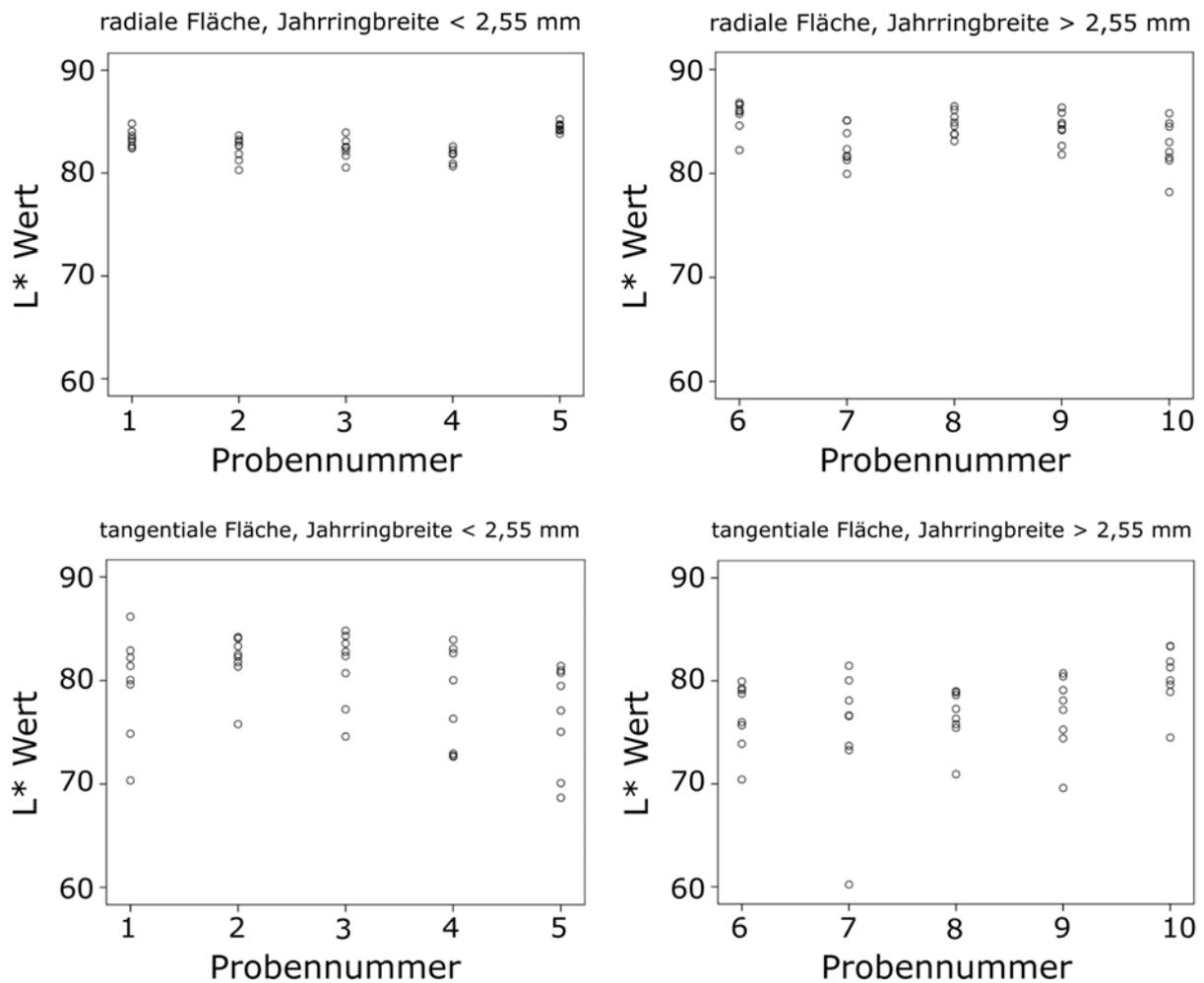


Abbildung 4.5: Darstellung der L^* -Farbwerte mit 11 mm Messfleckgröße für die verwendeten Eschenproben, aufgeteilt nach Schnittrichtung und Jahrringbreite

Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei den Messwerten für die Parameter a^* und b^* festgestellt. Es sind deshalb alle drei Farbparameter für weitere Analysen geeignet. Eine grafische Darstellung der

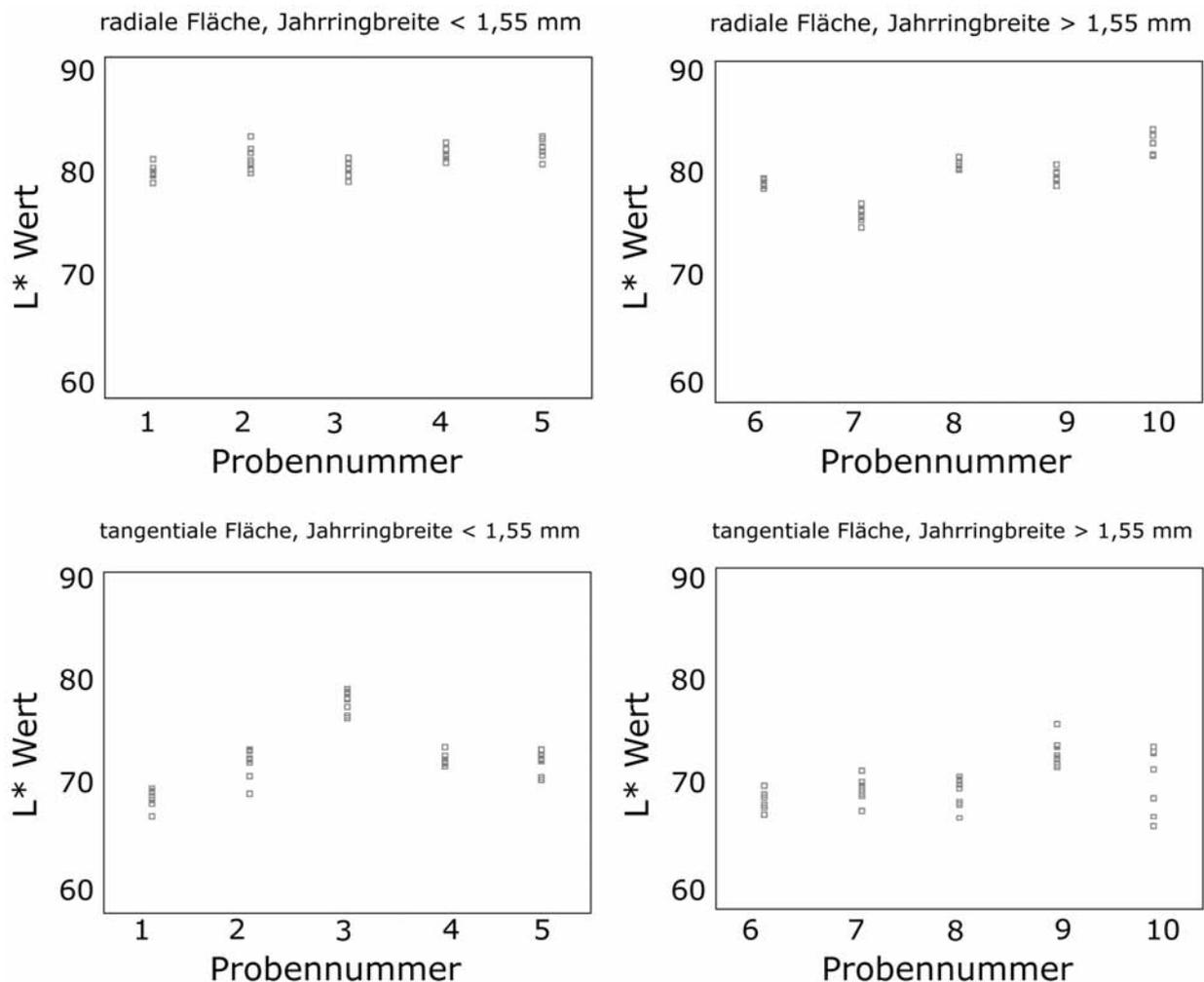


Abbildung 4.6: Darstellung der L*-Farbwerte mit 11 mm Messfleckgröße für die verwendeten Buchenproben, aufgeteilt nach Schnittrichtung und Jahrringbreite

gemessenen L^* , a^* und b^* Werte für die Buche und Esche zeigt Abbildung 4.7, wobei deutliche Unterschiede zwischen der radialen und tangentialen Holzoberfläche festgestellt werden können. Selbst der Abstand zwischen dem 1 und 3 Quantil ist bei den Werten auf der radialen Fläche geringer.

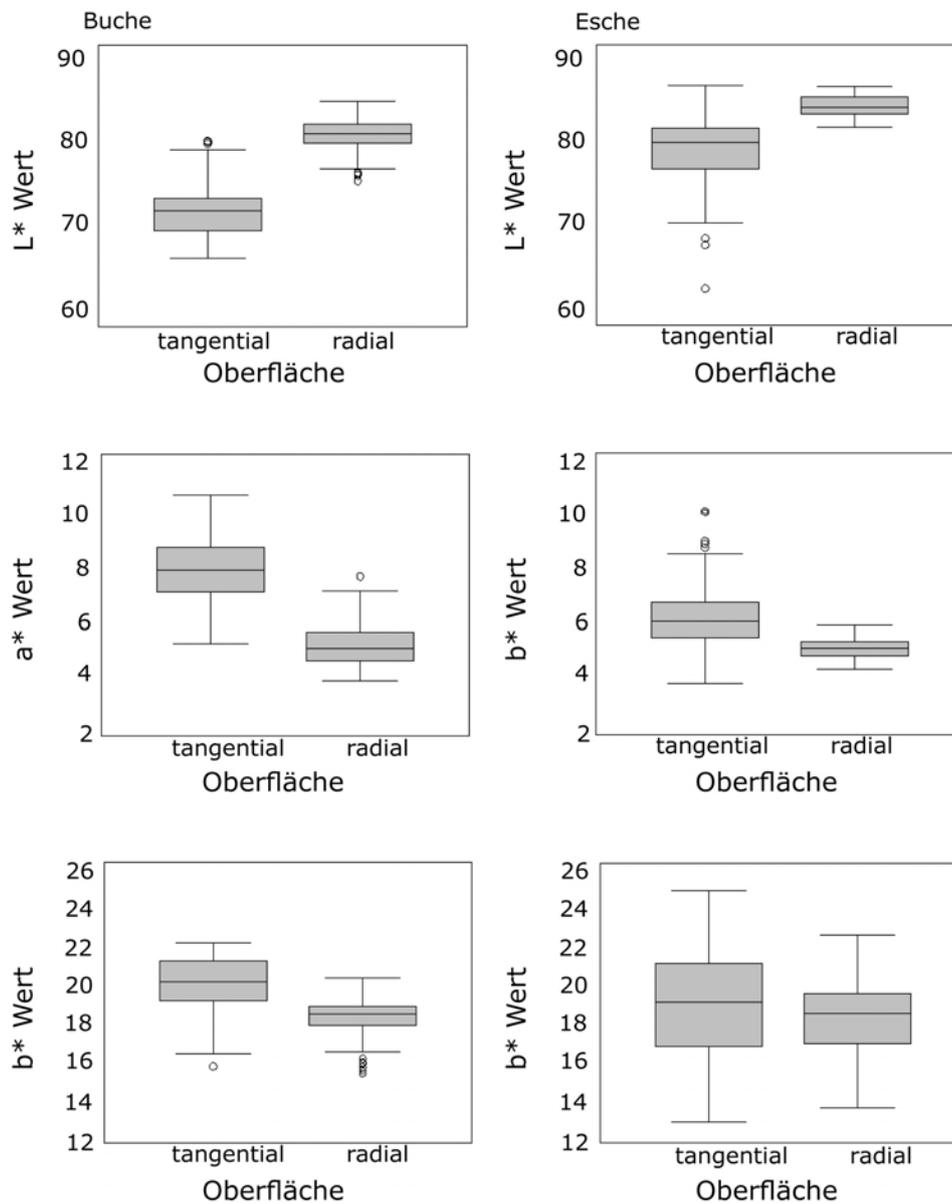


Abbildung 4.7: Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenorientierungen auf die Farbmessung

Der U-Test von Mann Whitney wurde verwendet, um die Unterschiedlichkeit der einzelnen Einflussgrößen statistisch zu prüfen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 dargestellt und zeigen einen signifikanten Unterschied (5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) der beiden Oberflächen und der Jahrringbreite bei der Farbmessung.

Eine Kategorisierung nach der Jahrringbreite zeigte deren Einfluss auf die Farbmessung, da die Jahrringabstände entscheidend für die Anzahl der Jahrringe im Messbereich sind. Folglich variiert der Anteil des Früh- und Spätholzbereiches.

Tabelle 4.1: Einfluss der Oberfläche (radial/tangential) und Jahrringbreite auf die Farbmessung

Einfluss	L*	a*	b*
Buchenholzproben			
Oberfläche	signifikant	signifikant	signifikant
Jahrringbreite	signifikant	signifikant	nicht signifikant
Eschenholzproben			
Oberfläche	signifikant	signifikant	signifikant
Jahrringbreite	signifikant	signifikant	nicht signifikant

Beckwith (1979) erwähnte Unterschiede zwischen den Messungen an den beiden Oberflächen (radial und tangential), jedoch wurden keine näheren Angaben über die Differenzen gemacht. Sullivan (1967a) lieferte ähnliche Ergebnisse über die geringere Varianz von Messungen auf radialen Holzoberflächen, jedoch stellte er keinen signifikanten Unterschied bei den Farbwerten der radialen zur tangentialen Oberfläche fest. Die damals verwendete Holzart Kirsche weist häufig Verfärbungen (grünstichig) auf (Wagenführ 2000) und ist dadurch unregelmäßig. Auch sind die Poren und Holzstrahlen sehr klein und über den ganzen Bereich gleichmäßig verteilt. Deshalb könnten die Holzstrahlen und Poren ein entscheidender Faktor bei der Messung von unterschiedlich ausgerichteten Holzoberflächen sein. Der Anteil der Holzstrahlen an der radialen Oberfläche ist bei Buche punktuell größer als an der tangentialen Schnittrichtung. Jedoch sind an der tangentialen Fläche die Holzstrahlen gleichmäßiger verteilt. Bei Eschenholz können die Poren einen wesentlichen Einfluss auf die Farbmessungen haben. An der radialen Fläche erscheinen die Poren in einem schmalen Bereich im Frühholz, während sich die Poren auf der tangentialen Seite oft wie ein breites Band (Abbildung 4.4) über einen größeren Bereich der Oberfläche erstrecken. Die Kleinflächigkeit der Holzstrahlen und Poren ermöglichten keine detaillierten Messungen der einzelnen Faktoren. Liu und Furuno (2001; 2002) analysierten mittels Scanner und Bildbearbeitungssoftware die Farbstreuung auf Holzoberflächen, dabei war die Varianz in den Poren- und Holzstrahlbereichen größer. Der Einfluss der Verteilung und Anordnung der Poren und Holzstrahlen auf die Farbmessung erscheint plausibel.

Die Analyse der beiden Schnittflächen ergab eine kleinere Varianz der an der radialen Oberfläche gemessenen Werte. Insofern können diese Ergebnisse für die weitere Versuchsanordnung genutzt werden, da eine kleinere Varianz die Feststellung von Veränderungen während eines Prozesses leichter ermöglicht und folglich die Messpunkte an der radialen Oberfläche mehr Informationen enthalten. Dieses Resultat kann für die Umsetzung eines Onlinemesssystems für z. B. die Holz-trocknung oder die thermische Modifikation von Holz herangezogen werden, da während eines

Prozesses meist nur eine begrenzte Anzahl von Messpunkten zur Verfügung stehen (Zimmer et al. 2008).

4.1.3 Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse über den Messbereich der Farbmessung an Holzoberflächen

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied bei der Farbmessung an radialer und tangentialer Schnittrichtung. Für eine aussagekräftige Interpretation von Holzfarbe ist es entscheidend, zwischen den beiden Oberflächen zu differenzieren. Die Messungen an der radialen Schnittfläche wiesen kleinere Streuungen auf und können folglich für eine Analyse der Veränderungen herangezogen werden, in welcher nur eine begrenzte Anzahl von Messpunkten möglich ist. Beispielsweise für Onlinemessungen während eines Prozesses, da hier meist nur wenige Messungen durchgeführt werden, daher ist bei diesen Anwendungen die Größe des Messbereiches (z. B. Fasersonde) von entscheidendem Einfluss. Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied der Farbmessung zwischen den 2,5 und 11 mm Messdurchmessern. Beide Messbereiche enthalten vergleichbare Informationen über die Holzfarbe.

4.2 Klassifizierung von Hölzern über Farbmessung

Bei der manuellen visuellen Sortierung, z.B. von Brettlamellen, sind hohe Dauerleistungen an den Begutachter gestellt. Nachteilige Auswirkungen auf das Ergebnis der Sortierung von Schnittholz kann durch eine automatisierte Erfassung von Unterteilungskriterien (etwa Farbe) verbessert werden. Am Beispiel von Fichte und Tanne sowie von Douglasie und Lärche wird die Klassifizierung durch die Farbwerte diskutiert.

Verschiedene Prozesse in der Holzverarbeitung verändern die Holzfarbe gezielt. Für die Überprüfung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Farben unterschiedlicher hygrothermischer Behandlungen ist eine objektive Farberfassung unumgänglich (Wimmer und Teischinger 2004; Putz et al. 2007; Pöckel 2007). Dieser Ansatz der Farbwerte als Klassifizierungsmerkmal könnte für die thermische Modifikation von Vollholz verwendbar sein und wird im folgenden Abschnitt behandelt.

4.2.1 Erkennung und Klassifizierung von Behandlungsintensitäten am Beispiel der Qualitätskontrolle von thermisch modifizierten Hölzern

Die Probenanzahl der einzelnen Holzarten und Behandlungsstufen variieren (Abschnitt 3.1.3). Es konnte jedoch aufgrund der großen Menge an untersuchten Proben eine statistische Analyse durchgeführt werden. Abbildung 4.8 zeigt die Farbänderung in allen Fällen bei Buchen- und Eschen-



Abbildung 4.8: Farbänderungen von Buchenholz (links) und Eschenholz (rechts) bei unterschiedlichen Behandlungsintensitäten

holzproben nach unterschiedlichen Behandlungsintensitäten (Abschnitt 3.1.3). Bei einem direkten Vergleich der einzelnen Holzarten und Behandlungsstufen konnten Unterschiede mit dem bloßem Auge festgestellt werden. Die Datenverteilung der einzelnen Farbwerte, aufgetrennt nach Holzarten und Behandlungsstufen, ist in Abbildung 4.9 ersichtlich. Der Einfluss der thermischen Modifikation

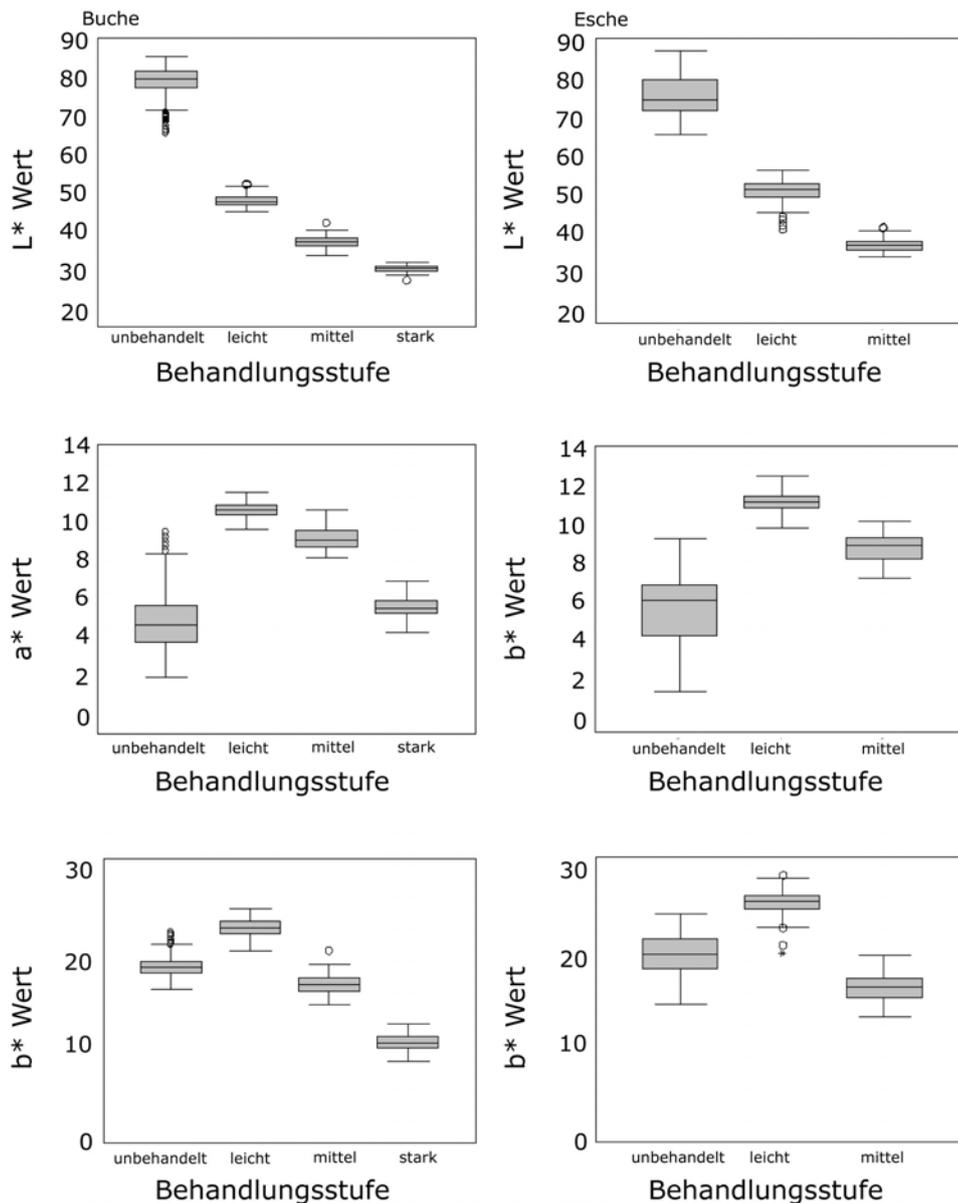


Abbildung 4.9: Einfluss der thermischen Modifikation auf die L*, a* und b* Farbwerte für Buche (links) und Esche (rechts)

auf die L*, a* und b* Werte ist unterschiedlich. Die L* Werte nehmen signifikant je nach Behandlungsintensität bei beiden Holzarten ab, folglich wird die Ausgangsfarbe dunkler. Die Veränderun-

gen der chromatischen Koordinaten der a*- und b*-Achsen erfolgen nach einem anderen Muster. Bei den leichten und mittleren Behandlungsstärken steigt der a* Wert bei beiden Holzarten an. Die modifizierten Proben weisen einen rötlicheren Farbton auf. Bei der stärksten Behandlungsstufe veränderte sich der a* Wert nur gering. Die b* Werte nehmen bei der leichtesten Behandlungsintensität zu, bei Erhöhung der Behandlungstemperatur kommt es zu einer Verringerung dieser Werte. Dabei variiert der gelbe Anteil der Farbe. Eine Verringerung der chromatischen Koordinaten führt zu einer Abnahme der Farbsättigung. Bourgois et al. (1991) veröffentlichten ähnliche Veränderungstendenzen der L*, a* und b* Werte während thermischer Modifikation von Holz und machten die chemische Veränderungen durch den Modifikationsprozess für die Farbänderungen verantwortlich. Die thermische Modifikation beeinflusste die Holzfarbe und jede Behandlungsintensität entwickelt eine einzigartige Farbe. Bei der Betrachtung aller drei Farbparameter steigt die Farbänderung mit zunehmender Behandlungstemperatur (Schnabel et al. 2007). Dieses Verhalten der Farbänderung wurde auch bei Fichtenholz nachgewiesen (Bekhta und Niemz 2003). Es ändern sich aber auch holztechnologische Eigenschaften mit zunehmender Behandlungstemperatur, beispielsweise natürliche Dauerhaftigkeit, Festigkeitseigenschaften, Quell- und Schwindverhalten (Hanger et al. 2002a;b; Junghans und Niemz 2006; Schnabel et al. 2007).

Tabelle 4.2: Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Buchen- und Eschenproben (Schnabel et al. 2007)

	Behandlungsintensitäten				Clusterzentren		
	unbehandelt	leicht	mittel	stark	L*	a*	b*
Buche							
Cluster 1a	249	0	0	0	79,5	5,4	18,5
Cluster 2a	0	78	0	0	50,6	10,8	22,6
Cluster 3a	0	0	61	0	40,6	9,4	16,7
Cluster 4a	0	0	0	110	34,0	6,1	10,6
Esche							
Cluster 1b	208	0	0	-	75,8	5,9	19,7
Cluster 2b	0	116	0	-	52,7	11,2	25,1
Cluster 3b	0	2	94	-	39,3	9,0	16,3

Die Ergebnisse der Clusteranalyse sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Die Behandlungsintensitäten stimmten mit den errechneten Clustern (1a, 2a, 3a und 4a) bei der Holzart Buche überein. Es wurden alle Proben bei Buche durch die Farbe richtig klassifiziert. Die unbehandelten Eschenproben konnten eindeutig dem Cluster 1b zugeordnet werden. Die Clusterbildung bei den modifizierten Hölzern erfolgte nicht eindeutig. Proben der leichten Behandlungsintensität teilten sich in Cluster 2b und 3b auf. Zwei Eschenproben wurden dem Cluster 3b, der mittleren Behandlungsintensität, eingeordnet. Eine genauere Betrachtung der Datenmenge führte zur Ursache der falschen Klassifizierung, beide Proben wiesen differenzierte L^* und b^* Werte gegenüber den anderen Proben in dieser Behandlungsstufe auf. Abbildung 4.10 zeigt die beiden Farbwerte für die verwendeten Bretter. Die relevanten Daten sind durch Kreise gekennzeichnet, betreffen die Brettnummer 135 und 145 und sind die falsch klassifizierten Proben. Im Vergleich zu den Mittelwerten sind bei beiden Proben deutliche Abweichungen ersichtlich. Die Analyse des a^* Wertes zeigte keine signifikanten Unterschiede.

Die Farbwerte der Clusterzentren mit den entsprechenden Toleranzen könnten für den Aufbau einer Qualitätskontrolle genutzt werden. Eine objektive Bestimmung der Farbe und die Einordnung in Farbtönen geben Produzenten, Lieferanten, Architekten und Bauherren eine Sicherheit über die Qualität von thermisch modifiziertem Laubschnittholz.

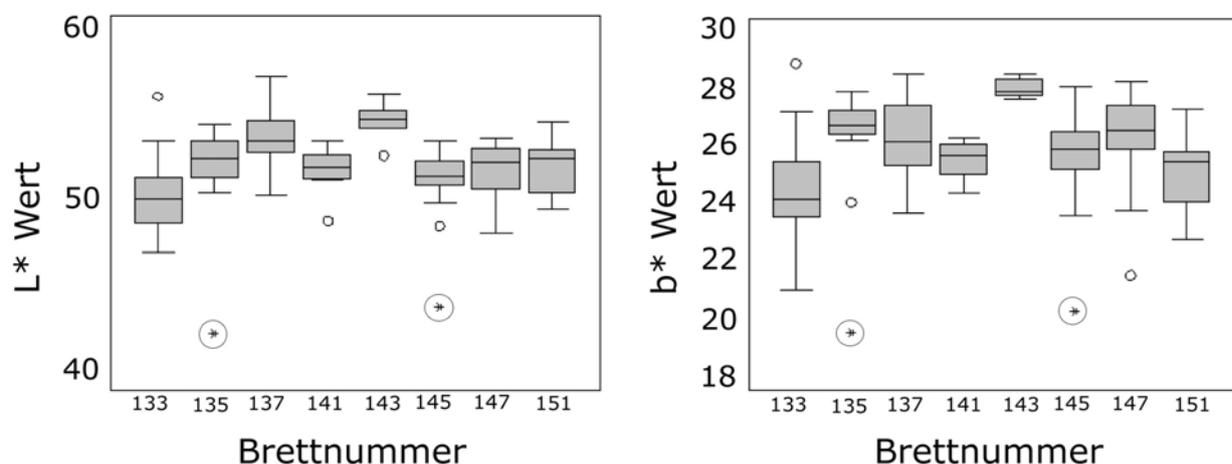


Abbildung 4.10: Einfluss der thermischen Modifikation (leichte Behandlungsstufe) auf die L^* und b^* Farbwerte für Esche. Die zwei falsch klassifizierten Proben sind durch Kreise markiert.

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Sicherheit bei der Klassifizierung von thermisch modifiziertem Laubschnittholz in unterschiedlichen Gruppierungen nach der Farbe. Folglich ist ein Einsatz der Farbmessung bei der Qualitätskontrolle nach dem Modifizierungsprozess möglich.

Diese Resultate führen zu Überlegungen betreffend der Möglichkeit einer Kontrolle und Steuerung des Modifikationsprozesses mittels Farbmessung (Abbildung 4.11) (Schnabel et al. 2007; Zimmer et al. 2008). Ergebnisse einer Farbmessung bei der Holz Trocknung (Pöckel 2007) und thermische Mo-

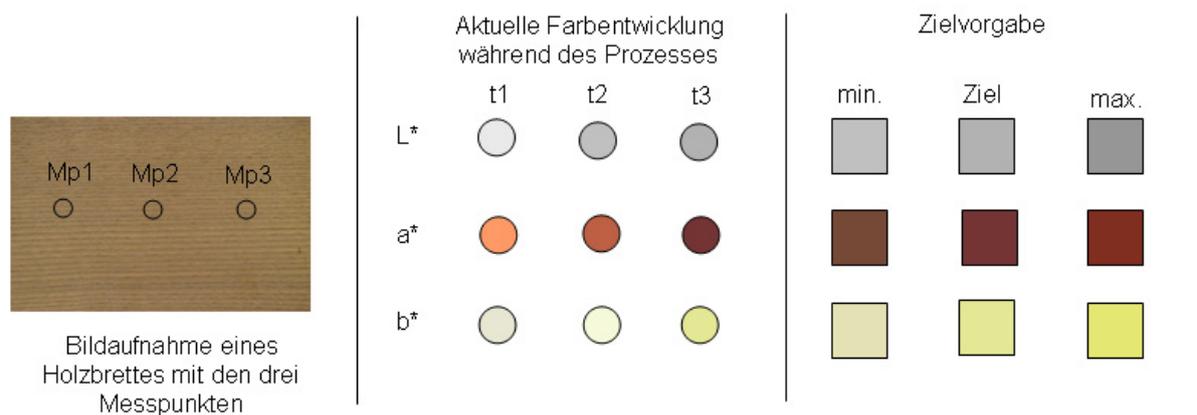


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung einer möglichen Methode für den Vergütungsprozess in Echtzeit. Ein Messsystem verarbeitet die gemessenen Farbwerte (L*, a*, b* im Messbereich m1, m2, m3) in unterschiedlichen Zeitperioden (t1, t2, t3) und vergleicht die Holzfarbe im Prozess mit den zu erreichenden Farbwerten (nach Schnabel et al. 2007)

difizierung im Labormasstab (Johansson und Morén 2006) mit laufender Probenentnahme ließen diese Schlußfolgerung zu. Sundqvist (2002) analysierte eine Farbkontrolle während des Holz Trocknungsprozesses. Die Überlegungen von Bourgois et al. (1991) gingen noch weiter, da sie schlussfolgerten, die Farbmessung als Zugang für physikalisch-chemische Parameter (z. B. Dichte, Anteile des Lignins) im Modifikationsprozess einzusetzen. Einen linearen Zusammenhang zwischen der Farbänderung und dem thermischen Masseabbau bei Fichte, Buche und Kiefer ermittelten Brischke et al. (2007). Bei Eukalyptus wurde ein vergleichbares Ergebnis des Masseabbaues und der einzelnen Farbwerte ermittelt (Esteves et al. 2008). Sie ermittelten gute Korrelationen ($r^2 > 0,86$) der Helligkeitsabnahme und der Konzentrationsabnahme von Polyosen und Lignin von Kiefernholz (*Pinus pinaster*). Bei den Extraktstoffen errechneten sie ein schlechtes Bestimmtheitsmaß.

Die Farbmessung kann grundsätzlich für die Bestimmung der optischen Qualität von thermisch modifiziertem Holz eingesetzt werden. Jedoch sind Farbmesswerte von Onlinemessungen während des Prozesses noch nicht veröffentlicht oder erhoben worden, hierbei fehlt eine systematische Aufarbei-

tung der Einflussfaktoren des Modifikationsprozesses auf die Farbmessung (Zimmer et al. 2008). Weitere Untersuchungen sind nötig, um die Farbmessung für eine Methode der Prozesssteuerung der thermischen Modifikation einzusetzen.

4.2.2 Unterscheidung von Holzarten durch Farbmessung und Klassifizierung

Eine Klassifizierung von unterschiedlichen Holzarten mit sehr ähnlichem visuellen Erscheinungsbild, die durch den Menschen nur nach genauer Betrachtung eindeutig unterschieden werden können, stellt für industrielle Anwendungen eine besondere Herausforderung dar. Durch Produktionssteigerungen und Arbeitskonzentration werden maschinelle Sortieranlagen nach Holzgüte und Holzarten (z. B. Vorsortierung bei der Keilzinkung für die Brettschichtholzproduktion) immer wichtiger. Eine Klassifizierung der Sortimente geht meist mit einer Qualitätssteigerung und Preissteigerung einher. Je kleiner der Werkstoff bei der Verarbeitung wird, desto schwieriger wird es, das Material einer bestimmten Gruppe von Merkmalen zuzuordnen. Die Klassifizierungsmerkmale nehmen ab und es müssen vermehrt Hilfsmittel für eine eindeutige Bestimmung eingesetzt werden.

4.2.2.1 Fichte und Tanne

Bei der visuellen Begutachtung der Proben konnte nur nach genauerer Betrachtung der holzatomischen Merkmale eine Unterscheidung der Holzarten getroffen werden. Abbildung 4.12 zeigt einen Überblick über die einzelnen Farbmesswerte der Proben von Fichten- und Tannenholz.

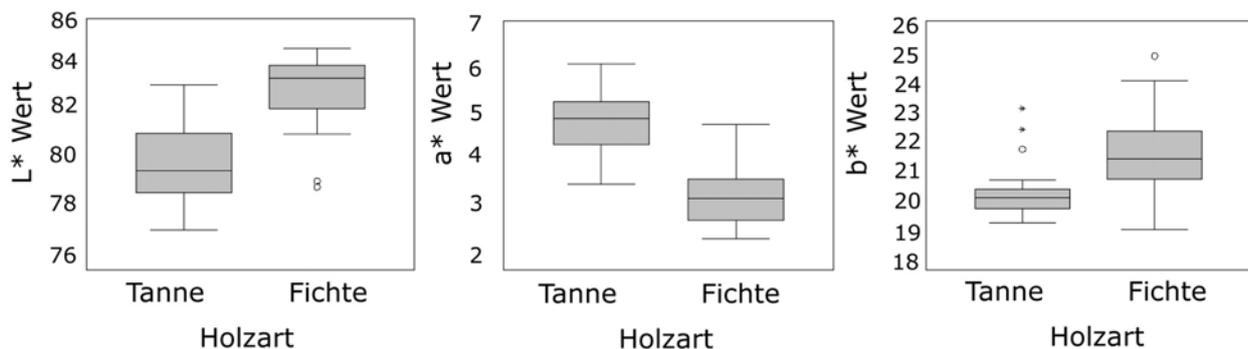


Abbildung 4.12: Farbwerte L*, a* und b* von Fichten- und Tannenholz

Alle Farbwerte der Holzarten weisen eine Überschneidung auf und können nicht eindeutig getrennt

werden. Eine Klassifizierung nach den 3 Farbparametern ließ keine eindeutige Einteilung zu (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3: Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Fichten- und Tannenproben

	Holzarten		Clusterzentren		
	Fichte	Tanne	L*	a*	b*
Cluster 1	46	15	83,1	3,7	21,4
Cluster 2	2	33	79,4	5,3	20,3

Die Fichtenproben wurden 95,8% richtig der Klasse „Fichte“ zugeordnet. Bei Tannenholz klassifizierte der mathematische Algorithmus 68,7% der Proben richtig. Die angegebenen Clusterzentren sind somit eine Mischung aus den Farbwerten beider Holzarten. Brunner et al. (1996b) erreichten bei der Klassifizierung von Kiefer (*Pinus contorta*) und Fichte (*Picea engelmannii*) mittels Auswertung der Reflexionsspektren im Bereich von 400 bis 1100 nm eine Klassifizierungsgenauigkeit von 80,0 %. Durch den Wellenlängenbereich war ein größerer Informationsgehalt der unterschiedlichen Holzarten vorhanden, wodurch eine höhere Sortiergenauigkeit erreicht wurde.

Bei der Betrachtung der einzelnen Messwerte fällt auf, daß eine fast lineare Abhängigkeit der L*- und a*-Werte vorliegt (Abbildung 4.13). Jedoch sind Überschneidungen der beiden Holzarten vor-

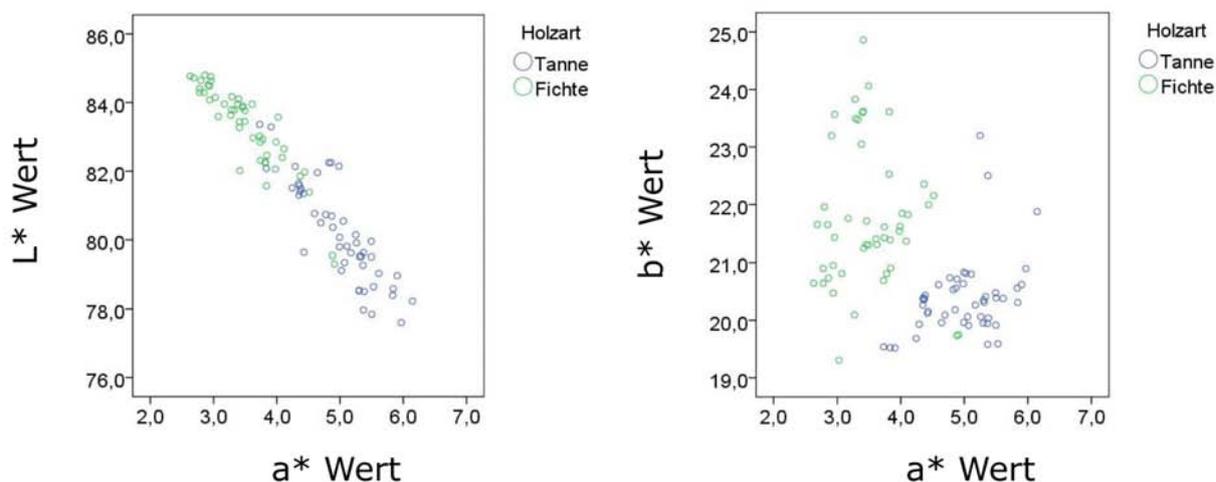


Abbildung 4.13: Farbwerte L*, a* und b* von Fichten- und Tannenholz

handen. Diese beiden Farbparameter lassen keine eindeutige Klassifizierung zu. Eine Analyse der L*- und b*-Werte lieferte vergleichbare Ergebnisse, aber es wurde kein Zusammenhang gefunden. Bei den a*- und b*-Werte im Streudiagramm ist eine Clusterbildung nach den Holzarten er-

kennbar, da nur 2 Proben nicht richtig zugeordnet werden können. Jedoch klassifizieren die eingesetzten Algorithmen der Clusteranalyse die beiden Holzarten anhand der Farbe nicht eindeutig. Bei der Verwendung von größerem Probenumfang werden sich die Prozentsätze der richtigen Klassifizierung gleichbleiben oder steigen, da angenommen werden kann, dass die Proben aus einer homogenen Grundgesamtheit entstammen. Folglich wird die Streuung durch die Anzahl der Proben nicht erhöht.

4.2.2.2 Douglasie und Lärche

Bei der visuellen Klassifizierung der Holzarten Lärche und Douglasie konnte ein Großteil schnell und zuverlässig eingeordnet werden. Jedoch war bei einigen Proben auch eine genauere Betrachtung der holzanatomischen Merkmale notwendig. Abbildung 4.14 gibt einen Überblick der einzelnen Holzarten und der Farbwerte L^* , a^* und b^* -Werte. Die L^* - und a^* -Werte der beiden Holzarten können nicht differenziert werden, jedoch ist der b^* -Wert unterschiedlich. Bei Anwendung der Clusteranalyse konnte eine 100-prozentige Klassifizierung der Lärchen- und Douglasienproben erfolgen (Tabelle 4.4). Die Clusterzentren geben die Mittelwerte der Farbwerte beider einzelnen Holzarten wieder. Brunner et al. (1996b) stellten bei der Identifizierung von Douglasie und Kiefer (*Pinus*

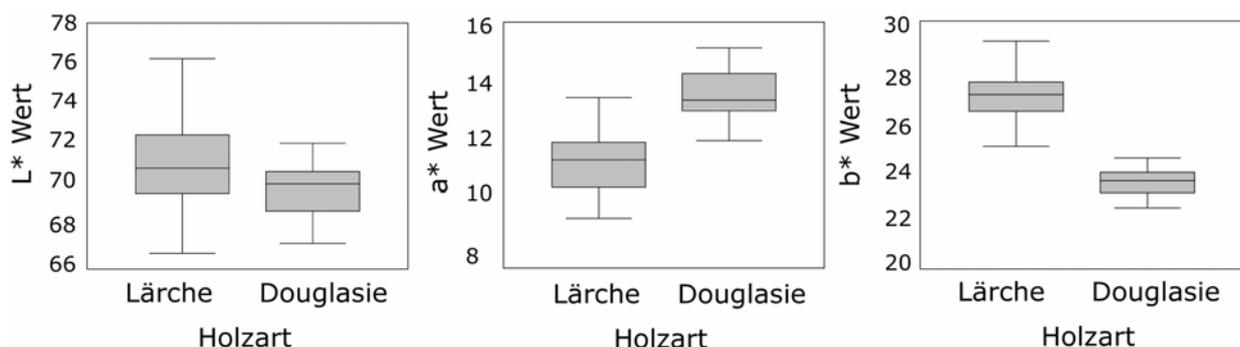


Abbildung 4.14: Farbwerte L^* , a^* und b^* von Lärchen- und Douglasienholz

contorta) vergleichbare Einteilungswahrscheinlichkeiten (98,7 %) fest.

Tabelle 4.4: Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Lärchen- und Douglasienholzproben

	Holzarten		Clusterzentren		
	Lärche	Douglasie	L*	a*	b*
Cluster 1	48	-	71,2	11,5	26,9
Cluster 2	-	48	69,9	13,7	23,5

4.2.3 Zusammenfassende Analyse über die Klassifizierung mittels Farbmessung

Durch den verwendeten Algorithmus (Single-Linkage) der Clusteranalyse wurde bei den thermisch behandelten Hölzern eine Möglichkeit für die Klassifizierung der unterschiedlichen Behandlungsstufen aufgezeigt. Eine 100-prozentige Einteilung konnte bei der Holzart Buche erreicht werden. Bei den Eschenproben konnten nur 2 von 416 Proben nicht richtig zugeordnet werden. Dadurch zeigt sich eine deutliche Möglichkeit der Anwendung der Farbmessung als Qualitätssicherungsinstrument bei der thermischen Modifikation von Holz. Die einzelnen Behandlungsstufen können eindeutig durch die CIEL*a*b* Farbwerte unterschieden werden. Vergleichbare Ergebnisse wie bei Buche lieferte die Untersuchung bei Douglasie und Lärche, wobei ein kleinerer Probenumfang verwendet wurde. Bei Fichten- und Tannenholz wurden eine sichere Klassifizierung nach Holzarten nur für 68,7 % bei Tannenholz und 95,8 % bei Fichtenholz erreicht.

Durch die Ergebnisse wird das Potential der Farbmessung für die Klassifizierung von unterschiedlichen Holzarten und thermisch modifizierten Hölzern aufgezeigt. Dies kann als Grundlage für weiterführende Untersuchungen mit automatisierten Farbmesssystemen dienen und läßt das Potential für die Anwendung der Farbmessung für die Qualitätssicherung anderer Holzverarbeitungsprozesse erkennen.

4.3 Visuelle Wahrnehmung der Farbveränderungen

Die nachfolgenden Bilder wurden unter vergleichbaren Bedingungen erstellt (Abschnitt 3.2.4) und verdeutlichen mögliche Unterschiede zwischen der subjektiven Farbwahrnehmung und der objektiven Farbmessung der Veränderungen an Oberflächen durch die Bewitterung (Abschnitt 3.2.6).

4.3.1 Douglasie



Zeit [Tage]	0	1	2	3	4	7	15	29
L*	70,7	63,5	62,7	61,1	60,3	58,8	57,1	57,8
a*	13,3	13,6	14,4	15,7	16,6	15,8	16,4	16,2
b*	24,2	23,0	25,2	27,0	28,4	29,6	29,3	28,8
ΔE^*	0	7,3	8,1	10,3	11,7	13,3	14,8	14,0
ΔL^*	-7,2	-0,8	-1,6	-0,8	-1,5	-1,6	0,7	
Δa^*	0,3	0,8	1,3	0,8	-0,8	0,6	-0,2	
Δb^*	-1,3	2,2	1,8	1,4	1,2	-0,3	-0,5	
ΔE^*	7,3	2,5	2,7	1,9	2,1	1,8	0,8	

Abbildung 4.15: Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Douglasienprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten

Im Laufe der Bewitterung sind Farbverschiebungen visuell und opto-elektronisch festzustellen (Abbildung 4.15). Die größte Farbverschiebung zwischen 2 benachbarten Abschnitten fand zwischen Referenzprobe und nach nur einem Tag natürlicher Bewitterung statt. Die Bereiche der Bewitterungstage von 1 und 2 sowie 3 und 4 und 7 bis 29 sind farblich nicht zu differenzieren. Ein Grenzwert der ΔE^* -Werte für eine visuelle Wahrnehmung bei Douglasie konnte nicht ermittelt werden.

Die Zunahme des Gelb-Anteiles der Holzfarbe wurde als Veränderung nicht wahrgenommen. Jedoch ist die Verschiebung in den Rot-Bereich visuell feststellbar.

4.3.2 Eiche

Abbildung 4.16 zeigt den Einfluss einer 29-tägigen Bewitterung im gerafften Zeitmaßstab dargestellt. Die kleinste Farbdifferenz zwischen zwei Bereichen (2. und 3. Tag) konnte wahrgenommen

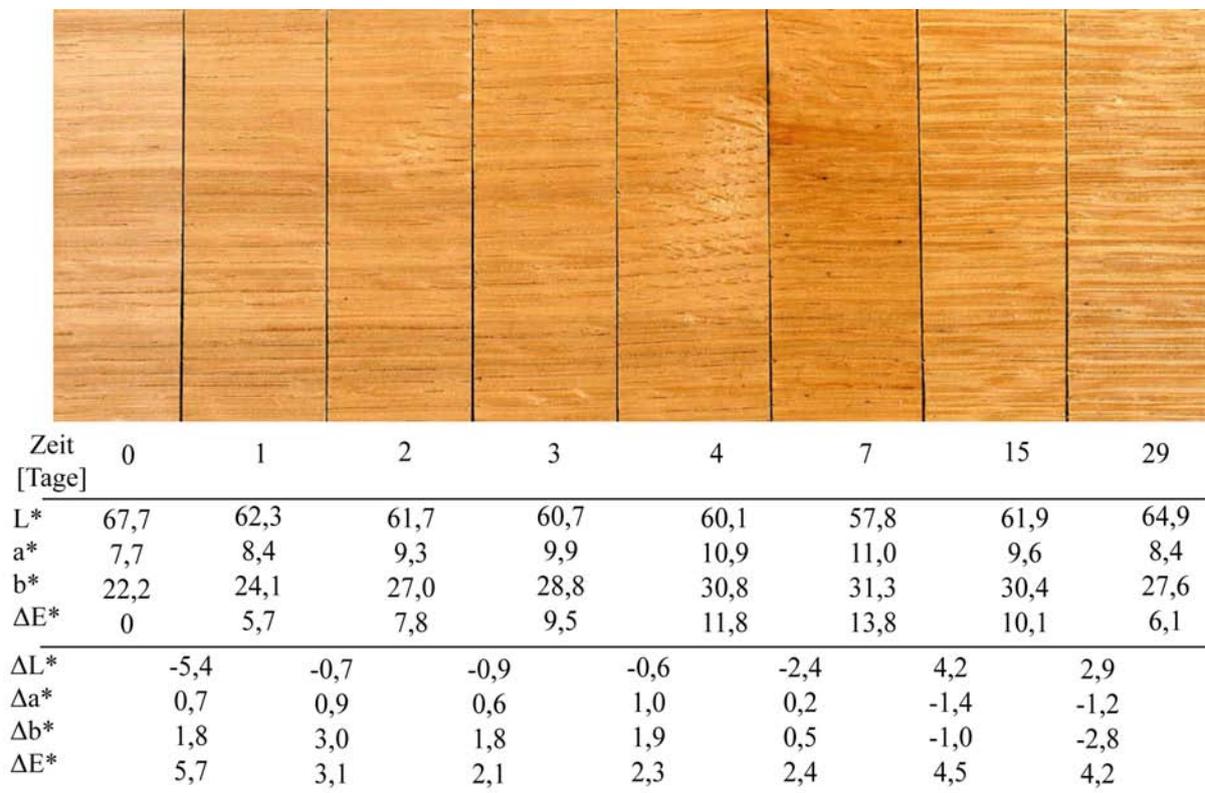


Abbildung 4.16: Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Eichenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten

werden. Nach der 7-tägigen natürlichen Bewitterung tritt eine Aufhellung ein. Inhaltsstoffe und degradierte wasserlösliche Produkte des Eichenholzes wurden durch den Niederschlag entfernt, dunkle Flecken unter der Eichenprobe lassen darauf schließen. Die Zunahme des Gelb-Anteiles der Holzfarbe konnte nicht nur messtechnisch, sondern auch visuell feststellbar ermittelt werden.

4.3.3 Fichte

Jeder einzelne Abschnitt der Fichtenprobe konnte visuell als unterschiedlich eingestuft werden (Abbildung 4.17). Die visuelle farbliche Wahrnehmung der Holzoberfläche weist Spielräume bei der

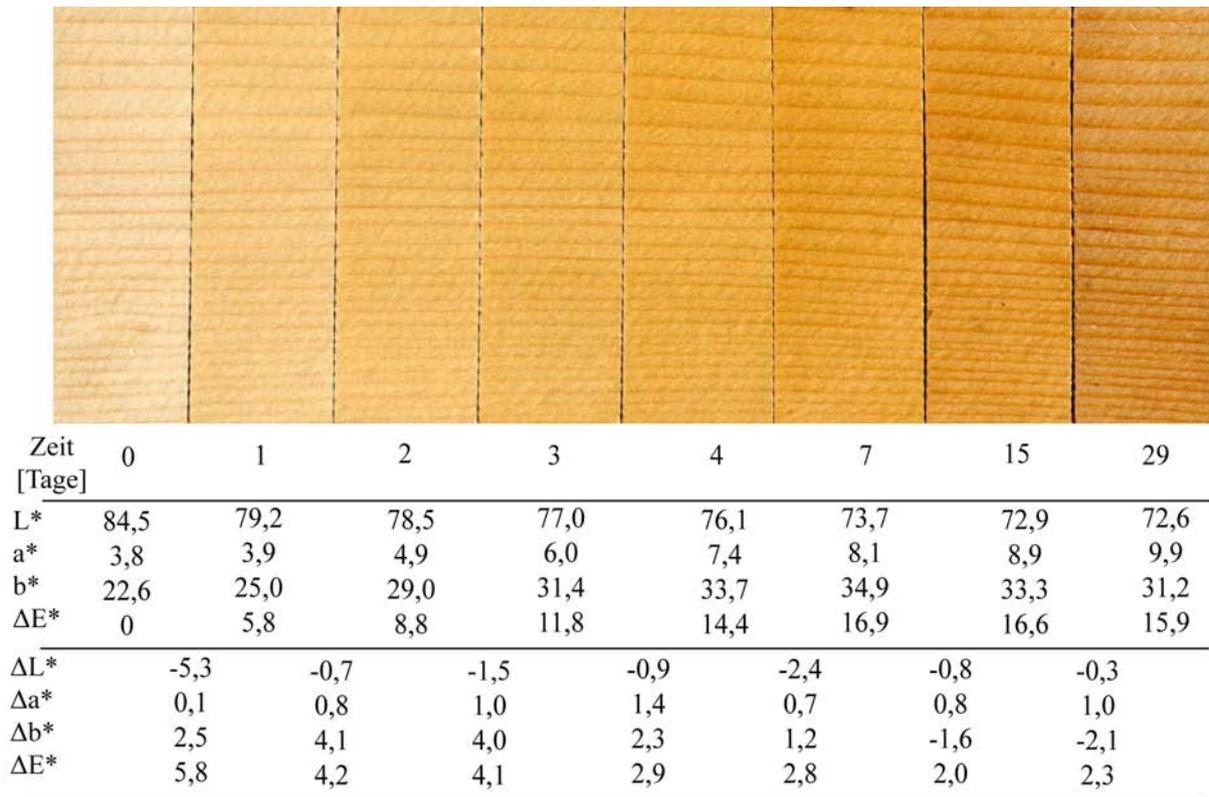


Abbildung 4.17: Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Fichtenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten

Beurteilung auf. Jedoch war eine Übereinstimmung zwischen den gemessenen CIEL*a*b* Koordinaten und der visuellen Wahrnehmung erkennbar. Ab dem zweiten Bewitterungstag nahmen die a* Werte stetig zu. Dieses Verhalten war auch visuell wahrnehmbar, da die Oberfläche der Fichtenprobe rötlicher erscheint. Anhand der Steigerung des b*-Wertes konnte die Zunahme des Gelb-Anteiles der Holzfarbe gezeigt werden.

4.3.4 Lärche



Zeit [Tage]	0	1	2	3	4	7	15	29
L*	67,6	59,8	59,3	58,3	57,6	56,1	55,3	55,1
a*	13,4	13,3	14,6	15,2	16,8	16,2	16,0	16,6
b*	26,9	23,7	26,0	27,3	29,0	30,1	29,7	29,7
ΔE^*	0	8,5	8,5	9,5	10,8	12,3	12,9	13,1
ΔL^*	-7,9	-0,5	-1,0	-0,7	-1,5	-0,8	-0,2	-0,2
Δa^*	-0,2	1,3	0,7	1,5	-0,6	-0,1	0,5	0,5
Δb^*	-3,2	2,4	1,3	1,6	1,1	-0,4	0,0	0,0
ΔE^*	8,5	2,8	1,8	2,4	2,0	0,9	0,6	0,6

Abbildung 4.18: Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Lärchenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten

Abgesehen von der Farbänderung nach dem ersten Tag waren die Farbdifferenzen benachbarter Abschnitte unter dem Wert 3,0 (Abbildung 4.18). Ein großer farblicher Unterschied konnte zwischen dem 4. und 7. Bewitterungstag festgestellt werden. Die Zunahme des Gelb-Anteils (b^*) der Holzoberfarbe wurde durch die Abnahme der Helligkeit (L^*) und die Steigerung des Rot-Anteils (a^*) überdeckt. Bei der Betrachtung der ganzen Probenoberfläche sind Unterschiede erkennbar, da hier größere Farbdifferenzen gemessen wurden.

4.3.5 Tanne

Abbildung 4.19 zeigt die Farbänderung einer Tannenoberfläche während einer Bewitterungsdauer von 29 Tagen. Die Farbänderungen von benachbarten Abschnitten sowie über die gesamte Pro-

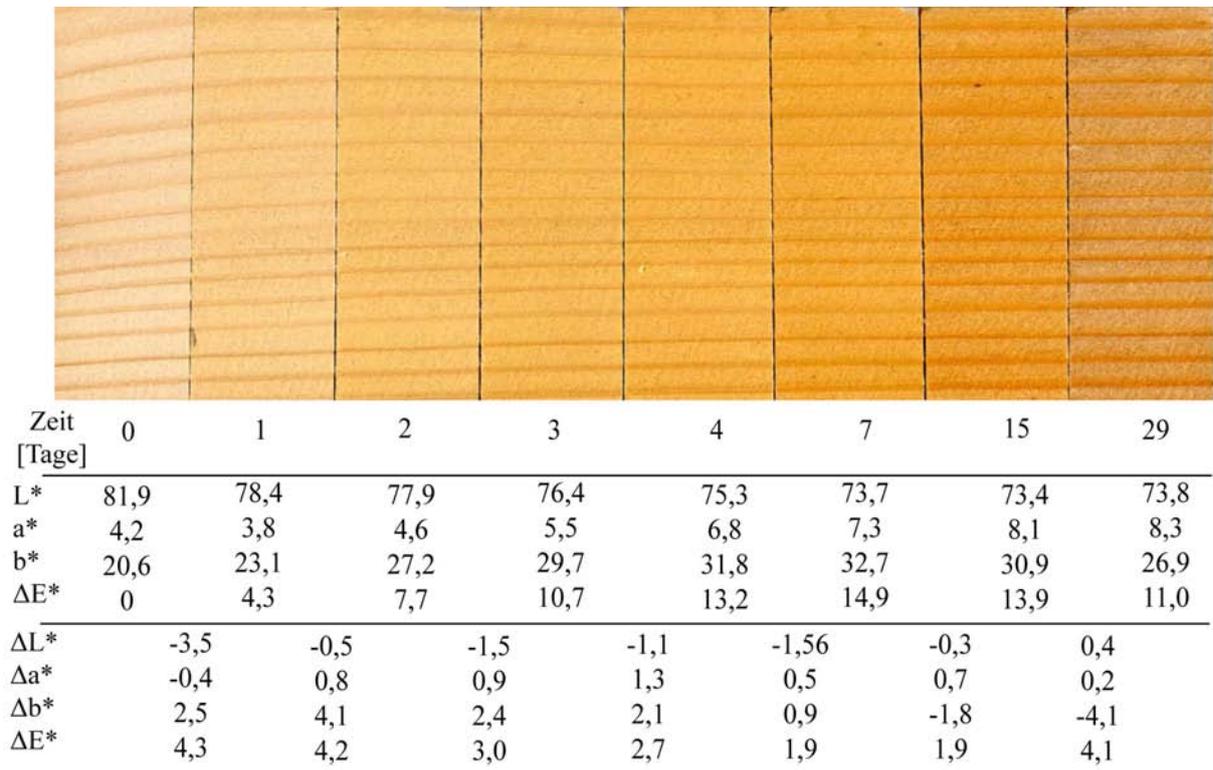


Abbildung 4.19: Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Tannenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten

benoberfläche sind durch das Auge wahrnehmbar. Nach dem 1. Bewitterungstag bis zum 15. Tag waren steigende b^* Werte (Vergilbung) erkennbar. Nach 29 Tagen Bewitterung fällt der b^* Wert des Tannenholzes. Ebenso ist eine Aufhellung im Frühholzbereich wahrnehmbar und lässt einen Einfluss auf den b^* Wert erkennen, da sowohl der L^* als auch der a^* Wert zunimmt. Eine deutliche wahrnehmbare rötliche Farbverschiebung findet ab dem 7. Bewitterungstag statt.

4.3.6 Diskussion der visuellen Farbwahrnehmung

Bei allen Holzarten kam es durch die Einflüsse der Bewitterung zu farblichen Veränderungen. Trotzdem wurden diese Farbverschiebungen nicht bei jeder Holzart in gleichem Ausmaß mit dem Auge wahrgenommen. Die Differenzen zwischen den Messwerten und der visuellen Wahrnehmung können auf die physiologisch unterschiedliche Farbwahrnehmung der Menschen zurückgeführt werden. Beispielsweise können im hellen Rot-Bereich weniger Farben unterschieden werden als im dunkleren Bereich (Völz 2001). Natürlich kann dieses Verhalten bei den Menschen von weiteren Faktoren abhängig sein (Abschnitte 2.5.1 und 2.5.2). Dieser Sachverhalt müsste im Zusammenhang mit Holzoberflächen durch weitere großangelegte Versuchsreihen analysiert werden.

Nicht bei allen Holzarten konnte eine Einteilung der wahrnehmbaren Farbänderung in Klassen nach Sandermann und Schlumbom (1962b) durchgeführt werden. Dabei werden die Farbdifferenzen in 4 Klassen eingestuft:

- (1) 0-2,3 keine Veränderung wahrnehmbar
- (2) 2,3-4,2 kaum wahrnehmbare Veränderungen
- (3) 4,2-10,0 deutlich wahrnehmbare Veränderungen
- (4) >10,0 sehr auffällige Veränderungen

Besonders bei Fichte und Tanne wurden auch Farbdifferenzen kleiner 2,3 als visuell unterscheidbar eingestuft, während bei Douglasie, Eiche und Lärche größere Differenzen als nicht wahrnehmbar eingestuft worden sind. Derartige visuelle Beurteilungen sind immer abhängig vom Prüfer und damit subjektiv.

4.3.7 Zusammenfassende Betrachtung der visuellen Wahrnehmung der Farbänderung

Die Ergebnisse der Analyse der visuellen Wahrnehmung der Farbänderung während der natürlichen Bewitterung zeigten ein uneinheitliches Bild der Hölzer. Die visuell sowie die gemessene bestimmte Farbe veränderte sich bei allen Holzarten während einer 29-tägigen Bewitterung. Bei Betrachtung der ΔE^* -Werte wurde eine Reihung nach der kleinsten Differenz durchgeführt (Tabelle 4.5). Nach

den visuellen wahrnehmbaren Veränderungen konnte eine Reihung nach der am wenigsten feststellbaren Unterschieden erfolgen.

Tabelle 4.5: Vergleich der Wahrnehmung der gemessenen Farbwerte und der visuellen Beurteilung
Einstufung der Verfärbungen der verwendeten Holzarten

Rang	gemessene Farbdifferenzen	visuelle Wahrnehmung
1	Eiche	Lärche
2	Tanne	Douglasie
3	Lärche	Eiche
4	Douglasie	Tanne
5	Fichte	Fichte

Beide Analysen zeigen verschiedene Ergebnisse. Eine höhere Probenanzahl und die visuelle Begutachtung durch mehrere Personen könnte eine höhere Aussagekraft liefern und müsste weiter verifiziert werden. Bei Betrachtung benachbarter Abschnitte sind Unterschiede in der Wahrnehmung feststellbar, was zu erwarten war. Die Untersuchung lässt jedoch eine subjektive Wahrnehmung von Farbdifferenzen unterschiedlicher Holzarten erkennen. Die Ergebnisse rechtfertigen den Einsatz der Farbmessung bei Fragestellungen der Holzverfärbungen bei unterschiedlichen Prozessen und die Notwendigkeit objektiver Beurteilung.

4.4 Veränderungen von Holzoberflächen durch Lichtstrahlung

Die Ergebnisse werden nach den Holzarten getrennt beschrieben und analysiert.

4.4.1 Feststellung der Verfärbungen von Holzoberflächen hinter Glas

Holz im Innenbereich wird nicht nur durch das gefilterte Sonnenlicht, sondern auch durch die künstliche Beleuchtung bestrahlt. Die möglichen Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung im Innenraum wurden bei diesen Untersuchungen nicht in Betracht gezogen, da die Proben nahe an einem Fenster platziert wurden und so der Einfluss durch Kunstlicht praktisch nicht gegeben war. Die Feststellung von Farbverschiebungen im Innenbereich dient als Grundlage für die Simulation möglicher Unterschiede zwischen natürlicher und künstlicher Farbänderung.

4.4.1.1 Thermisch modifizierte Edelkastanie

In Abbildung 4.20 sind die farblichen Veränderungen einer einjährigen Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem anhand von Holzoberflächen und gemessenen Farbwerten ersichtlich. Bei Betrachtung der Oberflächenbilder ist eine deutliche Farbverschiebung in den Gelbbereich nach dem Ende der Lichteinwirkung wahrnehmbar. Die Remissionsgrade zeigen zuerst einen Trend im Wellenlängenbereich von 510 bis 700 nm nach unten, aber bereits nach der zweiten Messung nach sieben Tagen stiegen die Werte stetig an. Die Veränderungen, bei Wellenlängen kleiner als 450 nm Wellenlänge, waren deutlich geringer ausgeprägt. Dieses Verhalten der Zu- und Abnahme der Remissionsgrade ist bei den L^* - und b^* -Werten erkennbar. Nach dem anfänglichen Abfall der L^* -Werte (Helligkeitswert) nahmen sie während der Lichteinwirkung zu. Ein vergleichbarer Trend zeichnete sich bei den b^* -Werten ab. Bei den a^* -Werten kam es anfänglich zu einer Verringerung. Jedoch nahmen diese nach 185 Tagen wieder zu und erreichten Werte, welche vergleichbar mit einer Lichteinwirkung nach 7 bis 28 Tagen waren.

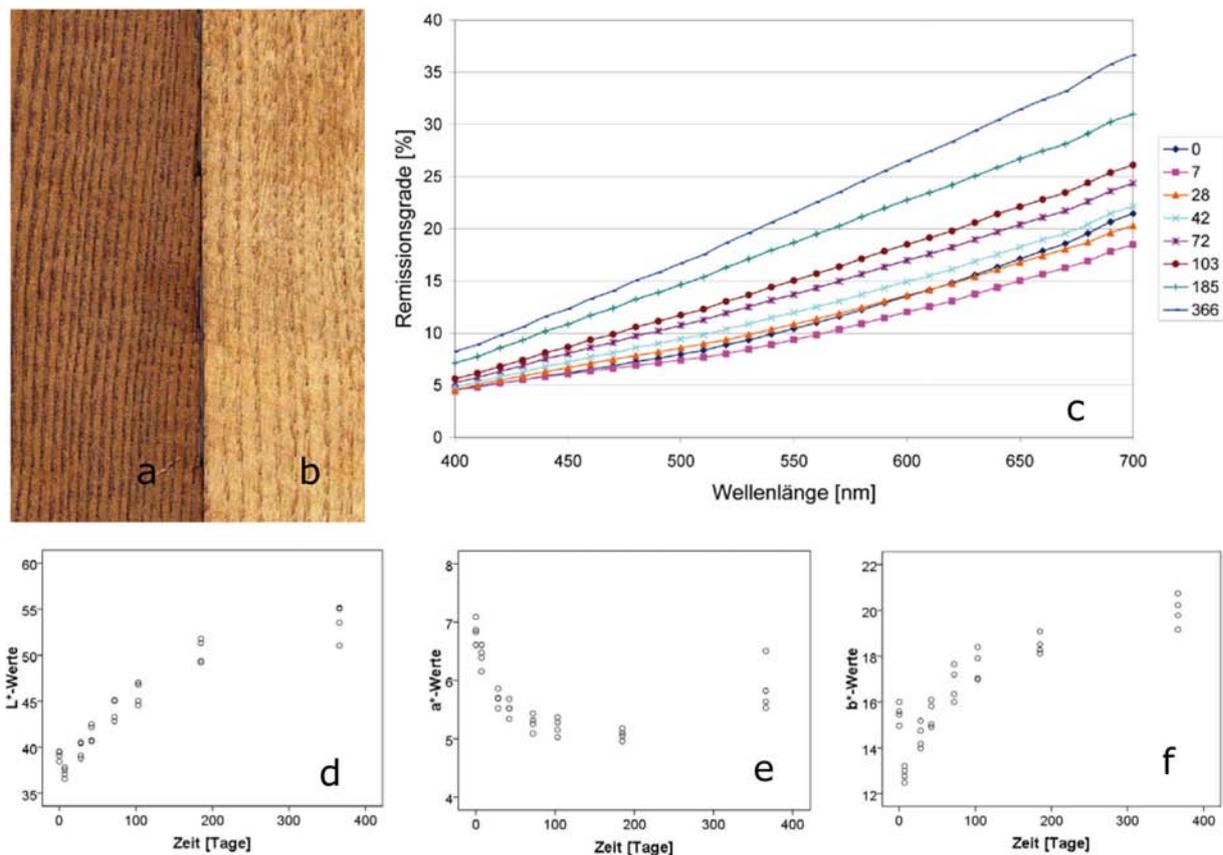


Abbildung 4.20: Farbveränderungen einer thermisch modifizierten Edelkastanieprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

4.4.1.2 Thermisch modifizierte Esche

In der Abbildung 4.21 sind die Werte und der visuelle Eindruck der Farbveränderung an thermisch modifizierter Esche (Behandlungsstufe 1) durch gefilterte Sonnenstrahlung ersichtlich. Eine Farbverschiebung in den Gelb-Bereich ist wahrnehmbar. Bei Betrachtung der Remissionsgrade ist ein Trend nicht feststellbar. Teilweise kommt es zwischen den einzelnen Messungen zu Überschneidungen, ausgenommen davon sind die Remissionsgrade nach dem 28. bis zum 103. Tag der Lichteinwirkungsdauer. Die L*-Werte steigen während der Lichtweirwirkung und konvergieren zum Ende der Messungen. Die anfängliche Verringerung der a*-Werte wird durch eine Zunahme der Werte nach einer Zeitdauer von 185 Tagen abgelöst, diese erreichen jedoch nicht mehr die Ausgangswerte. Die b*-Werte fallen in den ersten 28 Tagen ab, im Anschluss steigen diese Werte stetig.

Abbildung 4.22 zeigt Messwerte und die visuelle Wahrnehmung der Farbverschiebung an thermisch

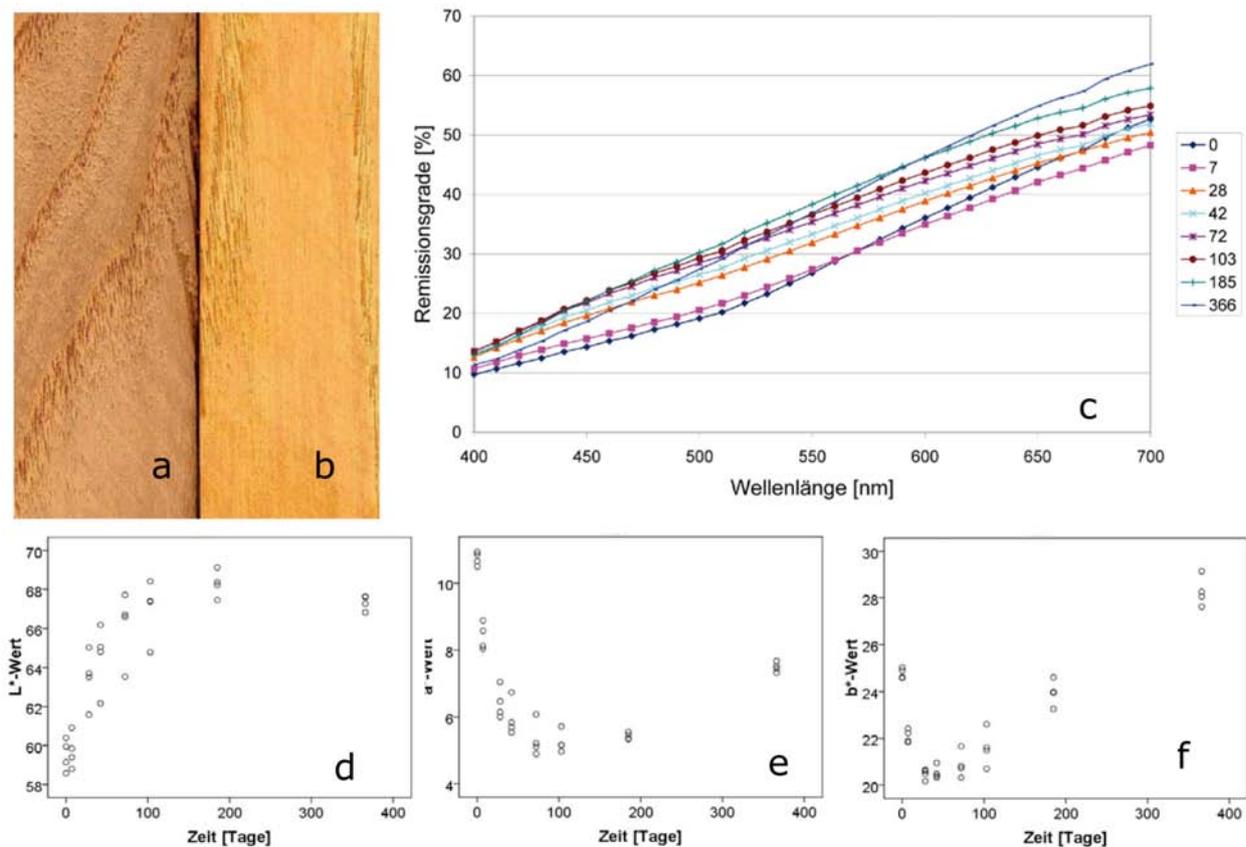


Abbildung 4.21: Farbveränderungen einer leichten thermisch modifizierten Eschenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfende, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

behandelter Esche (Behandlungsstufe 2) während einer gefilterten Sonnenbestrahlung über ein Jahr. Eine deutliche Verschiebung in dem Gelb-Bereich ist wahrnehmbar. In den ersten sieben Tagen fallen die Remissionsgrade im Wellenlängenbereich von über 520 nm ab. Erst danach steigen die Werte laufend an. Alle drei Farbwerte (L*, a* und b*) fallen in den ersten sieben Tagen, die a*-Wert sogar bis zum 28. Tag der Bestrahlung. Im Anschluss nehmen die Farbwerte stetig zu. Nach 366 Tagen lassen die L*- und b*-Werte ein Konvergieren an einem Maximalwert erkennen. Die a*-Werte weisen kein Abflachen der Veränderungen auf und nehmen stetig zu.

Beide thermisch modifizierten Eschenproben weisen einen vergleichbaren Verlauf der Farbverschiebungen auf. Dabei unterscheiden sich die Anfangs- und Endfarbwerte erheblich.

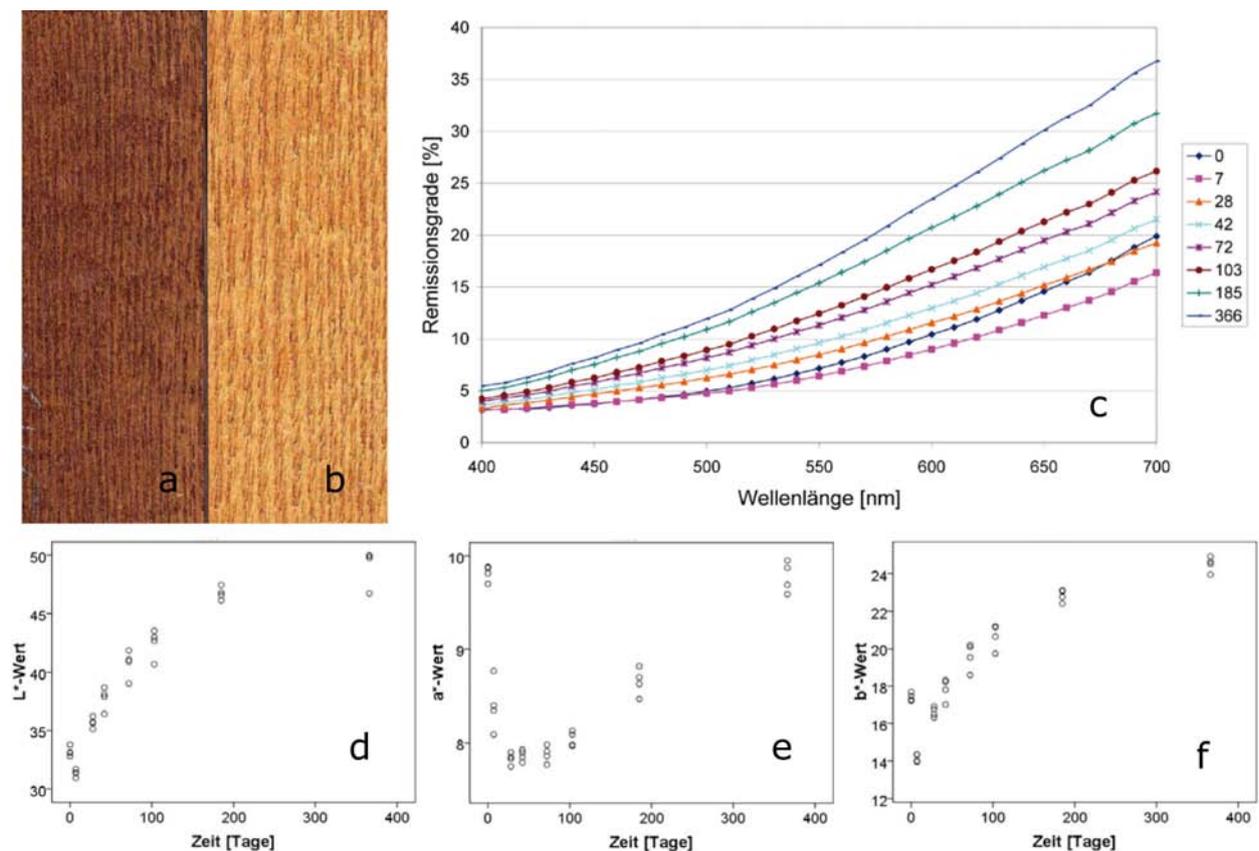


Abbildung 4.22: Farbveränderungen einer stark thermisch modifizierten Eschenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

4.4.1.3 Eiche

Eine deutlich Verschiebung in den Gelb-Bereich ist auch bei der Eichenprobe erkennbar (Abbildung 4.23). Der anfängliche Abfall der Remissionsgrade im Bereich über 460 nm nach sieben Bestrahlungstage kehrt sich um und entwickelt sich zu einer stetigen Zunahme der Werte über den 440 nm Wellenlängenbereich. Zwischen dem Bestrahlungszeitraum von 185 und 366 Tagen ist bei 540 nm ein Schnittpunkt der beiden Messungen, oberhalb dieses Punktes nehmen die Remissionsgrade weiter zu, unterhalb 540 nm fallen die Werte ab. Die anfängliche Abnahme der Remissionsgrade wird bei den L*- und b*-Werten ersichtlich. Danach erfolgt eine Zunahme beider Werte. Während die L*-Werte nach 366 Tagen sich einem Maximalwert annähern, lassen die b*-Werte ein stetiges Steigen erkennen. Die a*-Werte erreichen nach einem Abfall zu Beginn der Bestrahlung annähernd ihre Ausgangswerte wieder.

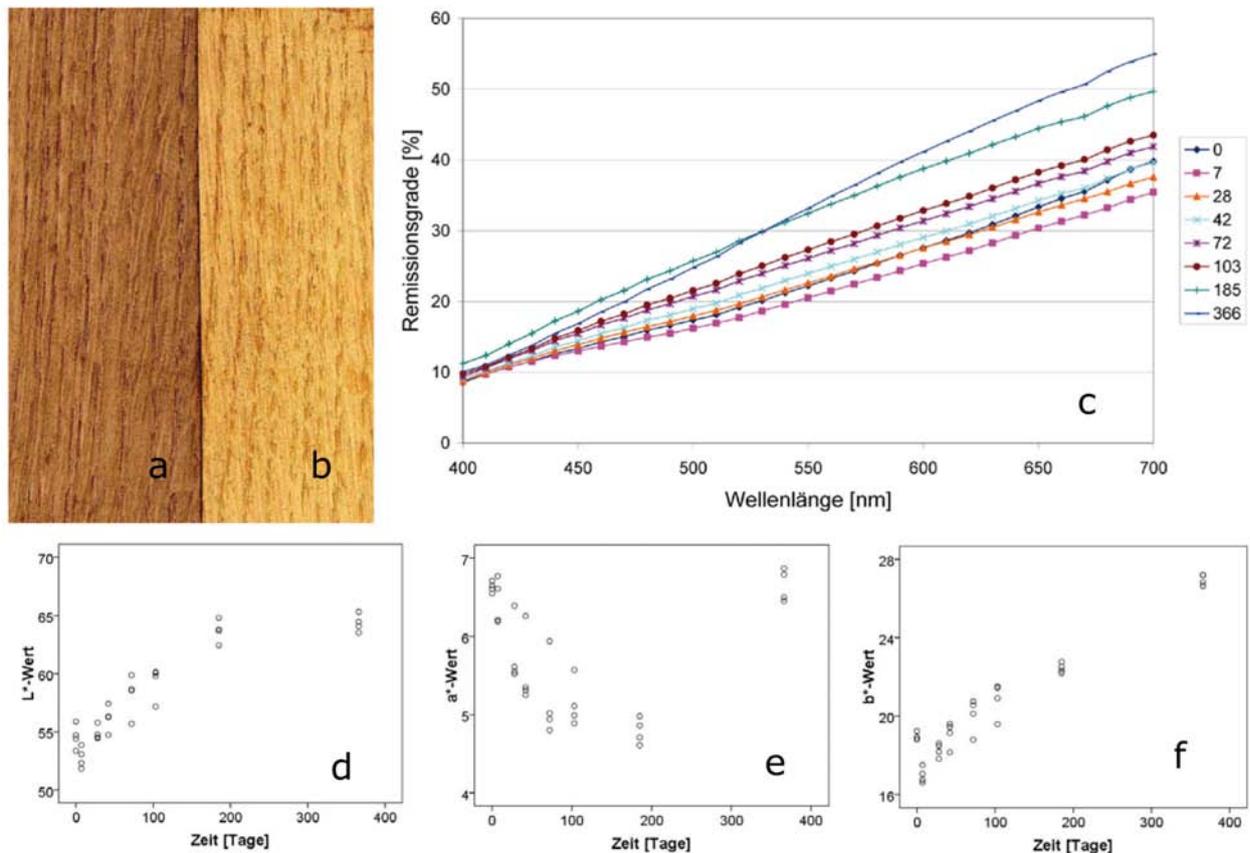


Abbildung 4.23: Farbveränderungen einer Eichenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

4.4.1.4 Fichte

Eine deutliche Differenzierung der unbestrahlten und bestrahlten Fichtenprobe ist möglich (Abbildung 4.24). Die Proben sind durch den Einfluss der gefilterten Sonnenstrahlung dunkler und rötlicher geworden. Eine Zunahme des Gelb-Anteiles der Holzfarbe ist ebenfalls festzustellen. Die Remissionsgrade weisen einen abnehmenden und abflachenden Trend auf. Eine Ausnahme ist die zweite Messung nach sieben Tagen, Werte über der ersten Messung sind im Bereich von 400 bis 450 nm feststellbar. Der steile Anstieg im Wellenbereich von 400 bis 440 nm verschwindet mit zunehmender Bestrahlungsdauer. Die L*-Werte fallen zu Beginn bis zum Ende der Bestrahlung stetig ab. Die a*- und b*-Werte weisen eine Abnahme nach den ersten sieben Tagen auf. Im Anschluss steigen diese Werte bis zum Ende. Die b*-Werte weisen ein konvergentes Verhalten nach 366 Tagen auf.

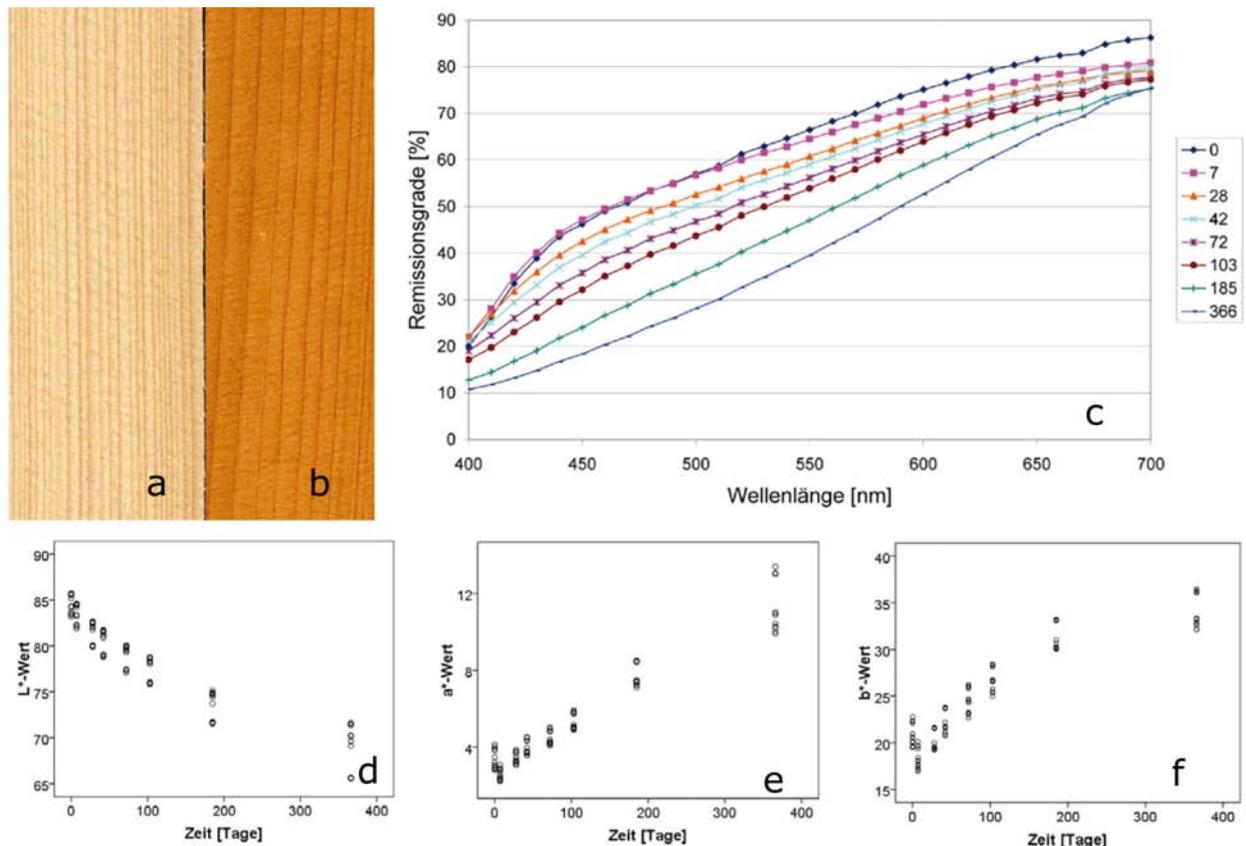


Abbildung 4.24: Farbveränderungen einer Fichtenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

4.4.1.5 Lärche

Die Holzoberfläche erscheint im Vergleich zur unbestrahlten Probe dunkler und bräunlicher (Abbildung 4.25). Die Remissionsgrade nahmen mit steigender Bestrahlungszeit ab. Nach einem starken Abfall der L*-Werte in den ersten 28 Tagen wurde die Abnehmrate kleiner, jedoch hielt der Trend über die ganze Bestrahlungszeit an. Die a*- und b*-Werte nahmen während der ersten sieben Tagen ab. Im Anschluss stiegen die Werte stetig an. Ein Annähern an einen Maximalwert nach 366 Bestrahlungstagen war bei den b*-Werten erkennbar.

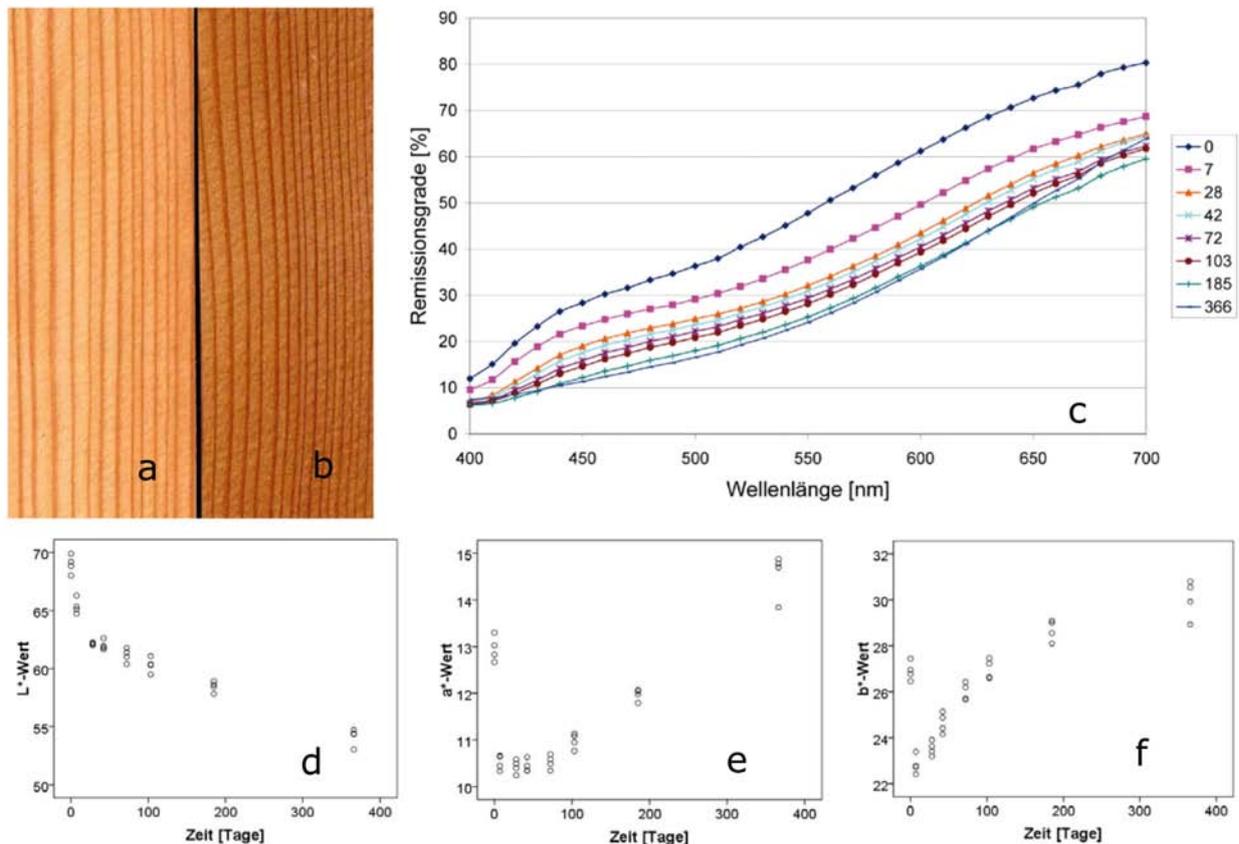


Abbildung 4.25: Farbveränderungen einer Lärchenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfende, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und b*-Werte

4.4.1.6 Tanne

Abbildung 4.26 zeigt die Farbänderungen durch gefiltertes Sonnenlicht über einen Zeitraum von 366 Tagen. Eine Verschiebung in den Gelb- und Rotanteil der Holzoberfläche ist erkennbar. Bei den Remissionsgraden ist ein Abnahme- und Abflachungstrend wahrnehmbar, wobei die zweite Messung eine Ausnahme darstellt, da eine Zunahme erkennbar ist. Der steile Anstieg im Wellenlängenbereich von 400 bis 450 nm nahm mit zunehmender Bestrahlungsdauer ab. Die L*-Werte (Helligkeitswert) nahmen mit steigender Bestrahlungsdauer stetig ab. Die a*- und b*-Werte fielen in den ersten sieben Tagen, jedoch im Anschluss stiegen beide Werte an. Dieser Trend zeigte sich bis zum Ende der Prüfzeit. Die b*-Werte nähern sich einem Maximalwert an.

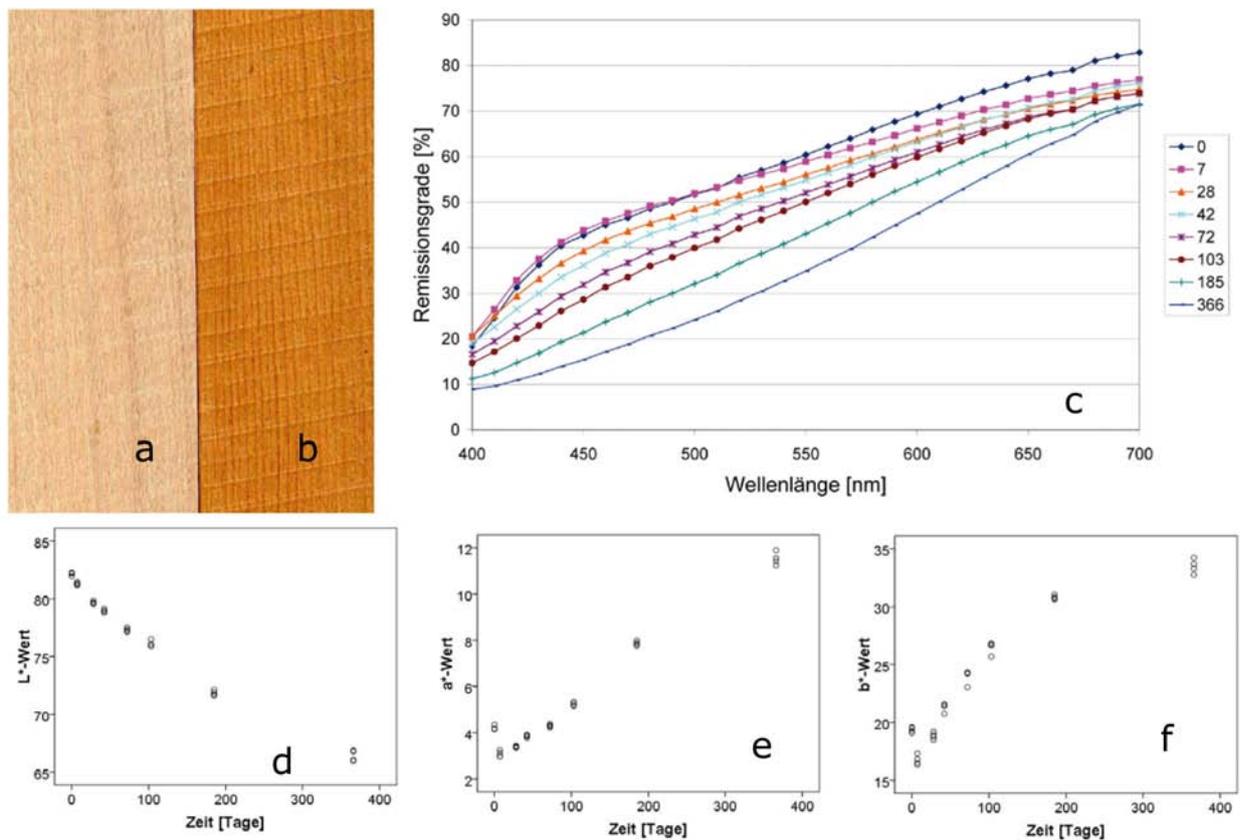


Abbildung 4.26: Farbveränderungen einer Tannenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte

4.4.1.7 Unterschiedliche Fensterglassysteme

Bei Fenstern werden zunehmend neuartige Glassysteme (z. B. Sonnen- und Wärmeschutzisolierglas) entwickelt und eingebaut. Insofern ergeben sich unterschiedliche Strahlungstransmissionen für unterschiedliche Fenster. Die Zu- oder Abnahme der Lichtbelastung im Innenbereich kann bei einer Gegenüberstellung der zwei Fenstersysteme zu unterschiedlichen Farbverschiebungen der gleichen Hölzer führen. Diese Analyse der Veränderungen bei unterschiedlicher Filterung von Fenstersystemen ist ein Ansatz im Hinblick auf die Simulation.

In Abbildung 4.27 ist der Einfluss unterschiedlicher Fensterverglasungen auf die ΔL^* -, Δa^* - und Δb^* -Werte, an Proben thermisch behandelte Edelkastanie und unbehandelte Eiche und Fichte während einjähriger Bestrahlung dargestellt. Die Δ -Farbwerte stellen die Differenz zwischen den unbelasteten Proben und nach einjähriger Bestrahlung dar. Die Abbildungen der anderen Holzarten sind im Anhang A.1 hinterlegt, da sich ein vergleichbarer Trend zwischen den dargestellten

und den im Anhang befindlichen Hölzern zeigte. Bei den beiden dargestellten Farbwerten der

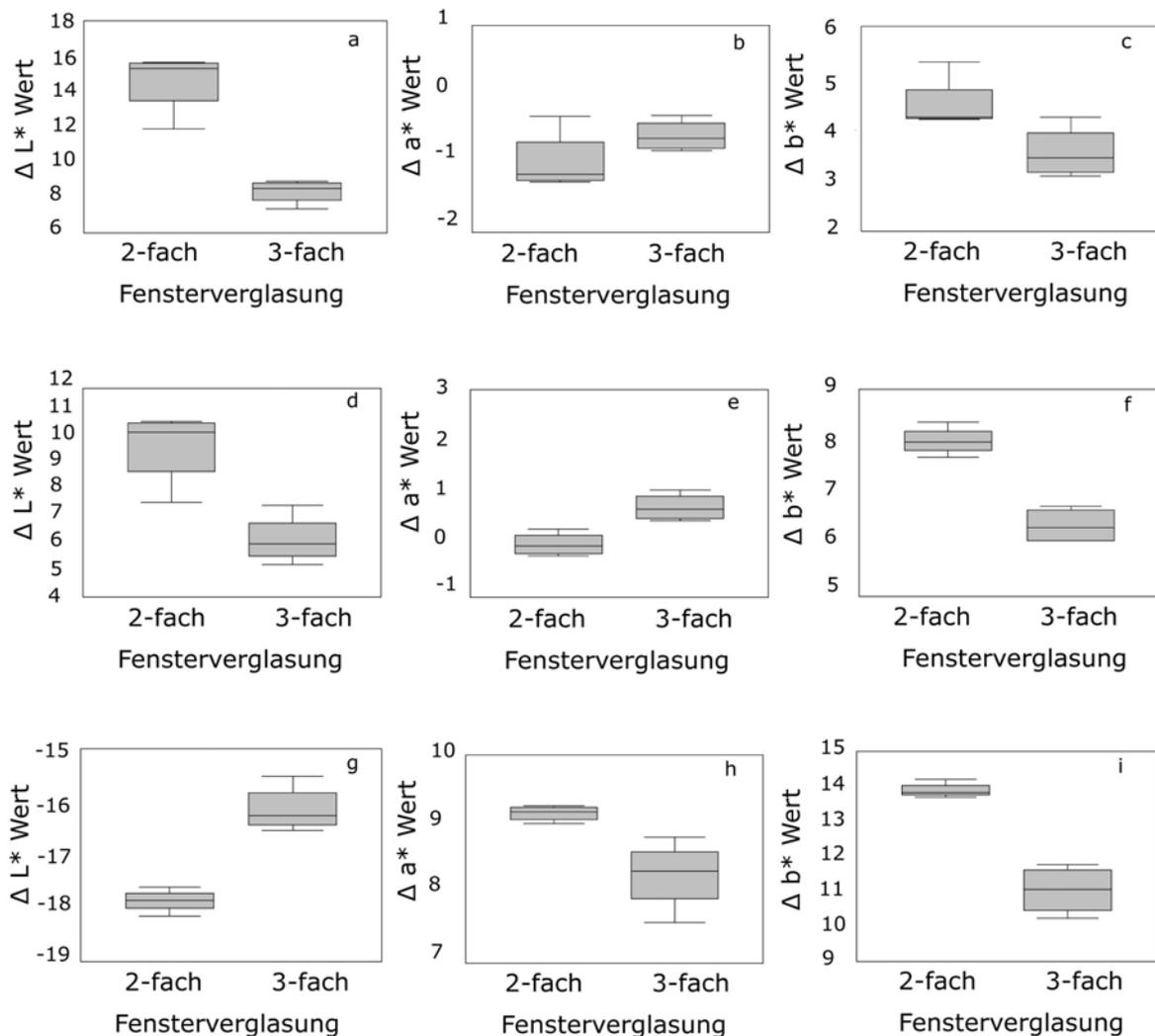


Abbildung 4.27: Einfluss der unterschiedlichen Filterung der Sonnenbestrahlung durch Fensterverglasung auf die L^* , a^* und b^* Werte für a-c: thermisch behandelte Edelkastanie, d-f: Eiche und g-i: Fichte

Laubhölzer zeigt sich ein vergleichbarer Trend der Unterschiede zwischen zweifach und dreifach Verglasung. Die ΔL^* - und Δb^* -Werte der Edelkastanie und Eiche waren bei dem 3-fach-Fensterglas deutlich geringer. Bei den Δa^* -Werten sind die Differenzen nach einjähriger Bestrahlung hinter der zweifachen Fensterverglasung geringer. Bei den Fichtenproben sind die ΔL^* -Werte bei höherer Fensterscheibenanzahl niedriger. Ein genau kontroverses Verhalten ist bei den Δa^* - und Δb^* -Werten sichtbar. Die höhere Anzahl der Fensterscheiben verursacht kleinere Δ -Werte. Die Unterschiedlichkeit der Farbverschiebung zwischen zweifacher und dreifacher Verglasung wird auf die dadurch resultierende differenzierte Transmission der Fenstersysteme zurückgeführt.

4.4.1.8 Abschließende Diskussion der Verfärbungen von Holzoberflächen hinter Glas

Bei allen Holzarten wurde eine deutliche Verfärbung an der Oberfläche ermittelt. Bei der visuellen Betrachtung fiel die deutliche Zunahme des Gelb-Anteiles der Holzfarbe auf. Die Untersuchung der Remissionskurven brachte im Vergleich zu den CIEL*a*b* Farbwerten (L^* , a^* , b^*) keine zusätzliche Aussagekraft. Folgerungen von Brunner et al. (1996b) und Butler et al. (2001), die Remissionskurven für die Analysen an Holzoberflächen zu verwenden, konnten nicht bestätigt werden, dies kann jedoch auf den unterschiedlichen verwendeten Wellenlängenbereich zurückgeführt werden. Dieser reichte vom sichtbaren Lichtbereich bis in den nahen Infrarotbereich und wurde nicht getrennt analysiert.

Thermisch modifizierte Hölzer erfreuen sich größter Beliebtheit für die Gestaltung im Innenraum. Jedoch gibt es keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen über die Farbveränderungen von thermisch modifizierten Hölzern im Innenbereich. Die Ergebnisse konnten daher mit keinen anderen Untersuchungen verglichen werden. Ayadi et al. (2003) ermittelten bei künstlichen Bewitterungsversuchen (Einwirkungen durch UV-Strahlung und Wasser) eine bessere Farbstabilität gegenüber nicht behandelten Hölzern. Jedoch wurden die Verfärbungen nicht mit Farbveränderungen bei natürlicher Bewitterung verglichen. Bei den vorliegenden Ergebnissen zeigten sich deutliche Verfärbungen durch die gefilterte Sonnenstrahlung im Innenraum.

Bei Fichte wurden vergleichbare Ergebnisse über die Farbwerte und den Änderungsverlauf durch Bestrahlung hinter Fensterglas bei den Untersuchungen von Schöftner (1989) gefunden. Chang und Chang (2001) berichteten über die starke Zunahme der Gelb-Anteile der Holzfarbe von Japanischer Zeder (*Cryptomeria japonica* [D] Don) durch die Bestrahlung im Innenraum über einen Zeitraum von 5 Jahren. Weitere aussagekräftige Analysen sind notwendig, um die individuellen Verfärbungen von Hölzern im Innenbereich zu ermitteln.

Der Vergleich zwischen zweifach und dreifach Verglasung lässt Unterschiede erkennen und zeigt weiteren Handlungsbedarf auf. Bei Isolierglassystemen werden gezielt der Wärmedurchgangskoeffizient (u-Wert) und der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) in Abhängigkeit von der Anwendung als Sonnen- oder Wärmeschutz verändert. Da sich durch den verstärkten Einsatz von Isolierglassystemen die Verfärbungen an Holzoberflächen im Innenbereich verändern, ist es notwendig, dieses Verhalten zu berücksichtigen. Die mehrfache Filterung der Sonnenstrahlung wirkt sich bei den untersuchten Holzarten unterschiedlich aus. Dieses unterschiedliche Verhalten der Filterwirkung auf die Verfärbung von Oberflächen (Holzmehl) zeigten auch Sandermann und Schlumbom (1962a) durch Versuche mit UV-Strahlung.

Auf Grund der Feststellung von Devantier und Emmeler (1997) über die Beeinflussung des Holzuntergrundes bei Farbänderungen von beschichteten Holzoberflächen kann eine Beschichtung die Farbveränderungen nur reduzieren, nicht aber zur Gänze verhindern. Besonders im Innenraum wird dieser Sachverhalt nur wenig beachtet, folglich sind nur einzelne Beschichtungen speziell für den Innenbereich entwickelt worden (Hayoz et al. 2003b).

4.4.2 Simulation der Verfärbungen von Holzoberflächen im Innenraum mit UV-Strahlung

Zurzeit werden drei unterschiedliche UV-Fluoreszenzlampen für die Simulation der Auswirkungen der Sonnenbestrahlung auf beschichtete Oberflächen in der Norm EN ISO 11507 (2001) empfohlen.

Im Innenbereich filtert das Fensterglas einen Teil des UV-Anteiles im Sonnenlicht aus (Abbildung 4.28), erst ab einer Wellenlänge von 380 nm liegt die Transmission bei 90 % der Strahlung und das Licht tritt fast ungehindert durch das Glas. Infolgedessen kann die Simulation von Verfärbungen im

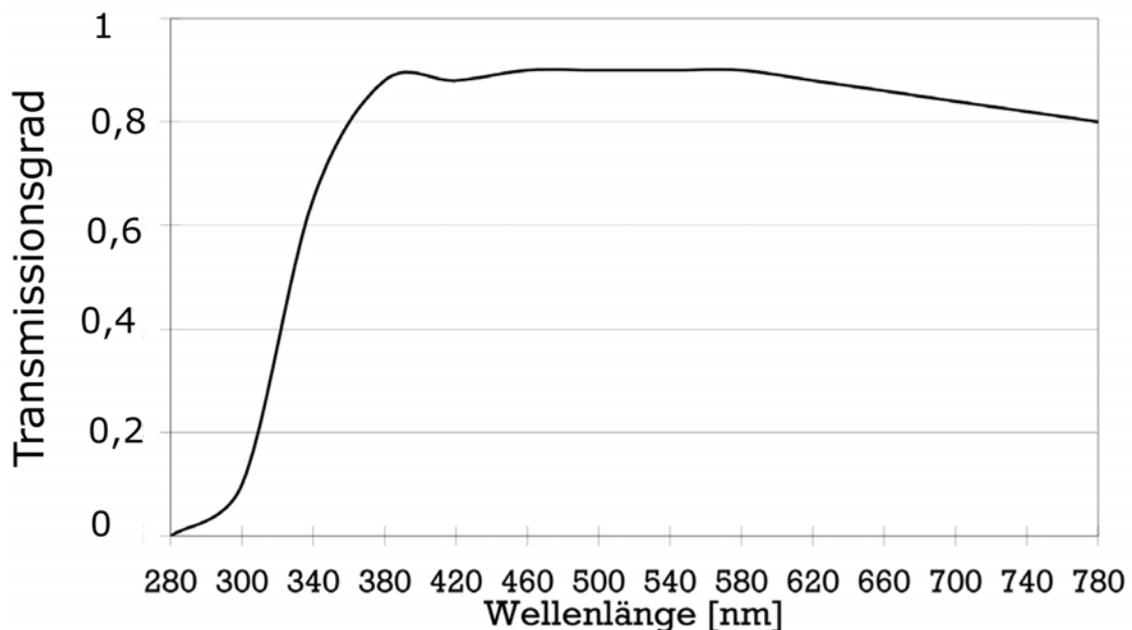


Abbildung 4.28: Transmissionsgrad hinter 3 mm starkem Fensterglas nach EN ISO 11341 (1997)

Innenbereich durch reine UV-Strahlung zu falschen Resultaten führen. Deshalb wurde die Eignung der Bestrahlung durch UV-Licht für eine Simulation von Farbverschiebungen überprüft. Die Tanne wurde wegen des Fehlens der Harzkanäle für diese Untersuchung herangezogen.

Abbildung 4.29 zeigt die Veränderung der Farbkoordinaten in Abhängigkeit der Bestrahlungszeit und der Lampentypen. Bei den Auswirkungen der UV-Strahlung auf die Farbwerte hinter dem 3 mm dicken Glas wurde keine eindeutige Trennung der unterschiedlichen Lampentypen festgestellt. Bei dem 6 mm dicken Fensterglas konnte teilweise eine Trennung der a^* - und b^* -Farbwerte der

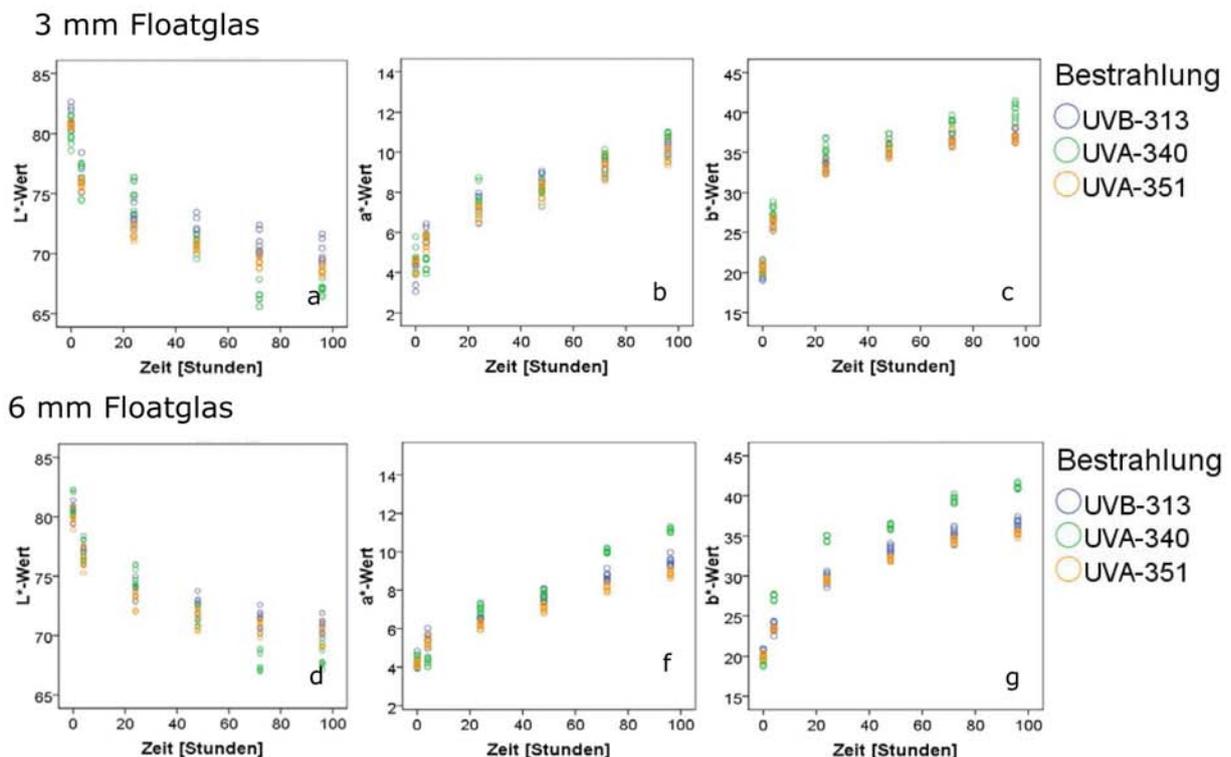


Abbildung 4.29: Einfluss der unterschiedlichen Filterung der künstlichen UV-Strahlung auf die L^* -, a^* - und b^* -Werte für Tanne hinter a-c: 3 mm Floatglas d-g: 6 mm Floatglas

Lampenarten zugeordnet werden. Die UVB-313 und UVA-351 Lampen haben vergleichbare Einflüsse auf die Farbparameter. Die UVA-340 Lampen weisen die größten Veränderungen auf. Die drei verwendeten Lampen überschneiden sich im Wellenlängenbereich, jedoch haben sie versetzte maximale Strahlungsintensitäten bei jeweils 313, 340 und 351 nm (Abbildung 3.5). Durch das 6 mm dicke Fensterglas wurden die Wellenlängenbereiche der einzelnen Lampentypen stärker gefiltert. Diese geringfügig differenzierten Wellenlängenbereiche bewirken eine unterschiedliche Intensität der Farbänderungen.

Mit dieser Erkenntnis wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde die Möglichkeit der Simulation von Holzverfärbungen im Innenbereich mittels UV-Fluoreszenzlampen überprüft. Die Einflüsse unterschiedlicher Wellenlängenbereiche der Lampen konnten hinter 3 mm starkem Fensterglas nicht mehr festgestellt werden, deshalb wurde bei den weiteren Versuchen die UV-

Strahlung der Lampentypen nicht mehr durch Glas gefiltert.

Abbildung 4.30 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Bestrahlungsarten auf die Farbwerte (L^* , a^* und b^*). Ohne Filterung der UV-Strahlung durch Fensterglas verteilen sich die Intensitäten der

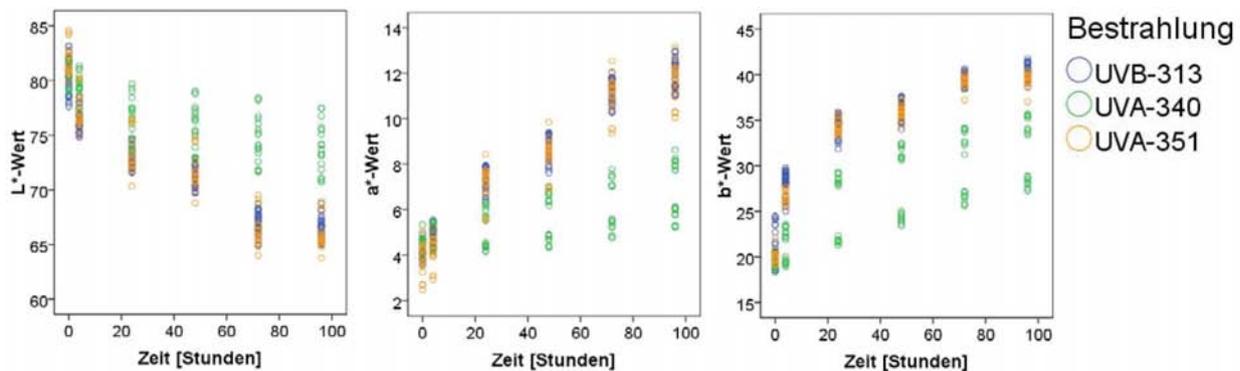


Abbildung 4.30: Vergleich der L^* -, a^* - und b^* -Werte von Tannenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

Farbänderungen der einzelnen Lampentypen unterschiedlich. Die UVA-340 Lampen weisen die geringsten Farbänderungen bei Tannenholz auf. Ohne Filterung der Strahlung durch Glas wird der ganze Wellenlängenbereich durch die beiden anderen Lampentypen überdeckt (Abbildung 3.5). Die Farbveränderungen hinter Glas (Abschnitt 4.4.1) der drei Farbparameter L^* , a^* und b^* werden durch die UV-Strahlung ungleichmäßig gut simuliert. Die Intensitäten der Helligkeit (L^*) und des Rot-Bereiches (a^*) des Sonnenlichtes werden nach 96 Stunden künstlicher Bestrahlung durch die UVB-313 und UVA-351 Lampen erreicht. Jedoch wird der Gelb-Bereich (b^*) nach 24 Stunden erreicht, nach 96 Stunden ist die Vergleichbarkeit der Intensität zwischen beiden Bestrahlungsarten nicht mehr gegeben, die Proben der Simulation weisen eine wesentlich größere Vergilbung auf. Der Einfluss der UVA-340 Lampen ist deutlich geringer und nach 96 Stunden konnte nur eine Übereinstimmung mit den b^* -Farbwerten der natürlich bestrahlten Proben festgestellt werden.

Die Verfärbungen der Fichtenproben sind in Abbildung 4.31 dargestellt. Die Auswirkungen der drei UV-Fluoreszenzlampentypen auf die Farbe können nicht mehr eindeutig getrennt werden. Der Helligkeitsparameter (L^*) und der Parameter des Rot-Bereiches (a^*) ist nach 96 Stunden künstlicher Bestrahlung mit der natürlichen Bestrahlung hinter Fensterglas über einen Zeitraum von einem Jahr vergleichbar (Abschnitt 4.4.1). Der Parameter des Gelb-Bereiches (b^*) ist nach 24 Stunden künstlicher Bestrahlung mit einer natürlichen Veränderung über einen Zeitraum von einem Jahr vergleichbar.

Der Einfluss von unterschiedlichen Bestrahlungen auf die Farbveränderung bei den Lärchenproben ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Die Helligkeitswerte (L^*) der künstlich bestrahlten Proben lie-

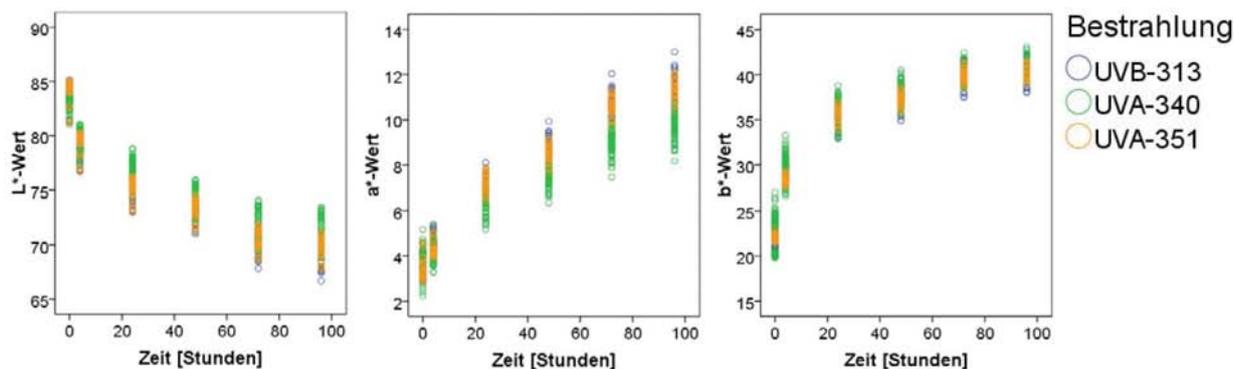


Abbildung 4.31: Vergleich der L^* -, a^* - und b^* -Werte von Fichtenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

gen hinter denen der natürlichen Bestrahlung. Vergleichbare a^* -Werte werden nach 72 Stunden erreicht. Die b^* -Werte künstlich und natürlich bestrahlter Proben können nach 24 Stunden simu-

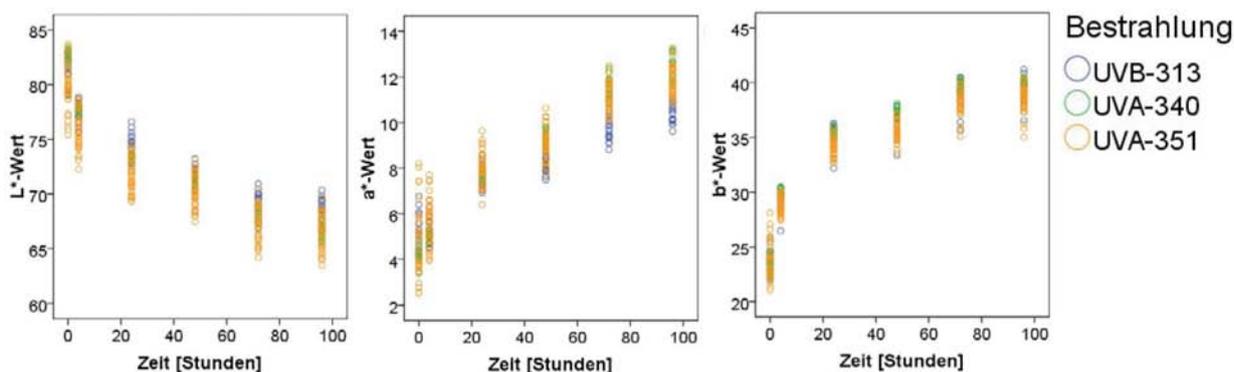


Abbildung 4.32: Vergleich der L^* -, a^* - und b^* -Werte von Lärchenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

lierter Bestrahlung nicht unterschieden werden. Ausnahme bildet der Einfluss der UVB-313 Lampe auf den Farbwert b^* . Dieser Lampentyp weist nach 24 Stunden Bestrahlung wesentlich höhere Werte auf.

Abbildung 4.33 zeigt die Auswirkungen der natürlichen und künstlichen Bestrahlung von Eichenholzproben. Bei den L^* -Werten waren deutliche Differenzen festgestellt worden. Die künstlich beleuchteten Proben wurden gegenüber den natürlich beleuchteten Proben dunkler. Der Rot-Anteil (a^*) der ultraviolett bestrahlten Eichenproben stieg signifikant an. Die Zahlensprünge bei den L^* - und a^* -Werten können durch einen 2-stündigen Kondensationsprozess erklärt werden, da wasserlösliche Produkte ausgeschwemmt wurden. Vergleichbare b^* -Werte der natürlichen Sonnenstrahlung hinter Fensterglas konnten nur mit den UVB-313 Lampen erreicht werden.

Bei den thermisch modifizierten Laubhölzern konnten nur geringe Überschneidungen zwischen na-

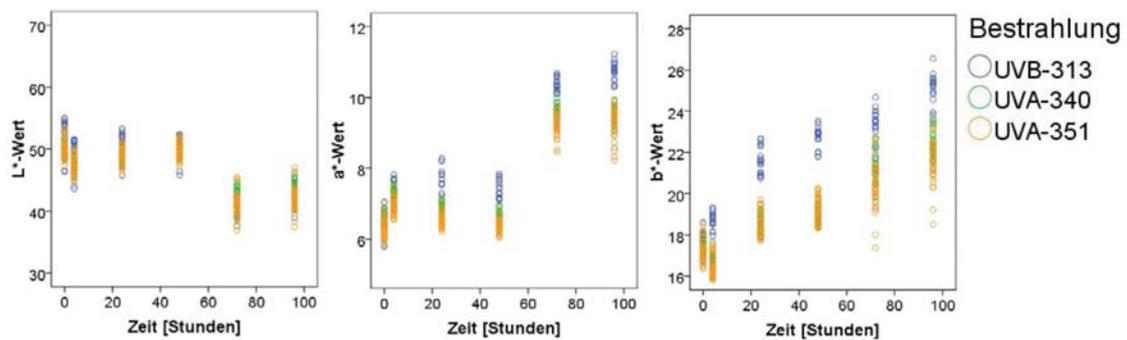


Abbildung 4.33: Vergleich der L*, a*- und b*-Werte von Eichenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

türlicher Bestrahlung (Abschnitt 4.4.1) und Umweltsimulation festgestellt werden (Abbildungen 4.22, 4.21, 4.20, 4.34, 4.35).

Die L*-Werte stiegen durch den Einfluss der gefilterten Sonnenstrahlung, die Oberflächenfarbe wurde heller. Jedoch verringerten sich bei der Simulation die Helligkeitswerte geringfügig. Auch die a*-Werte veränderten sich unterschiedlich zwischen der natürlichen Bestrahlung und der reinen UV-Bestrahlung mit Ausnahme der thermisch behandelten Edelkastanie und der stark behandelten Eschenproben. Ein Sprung der einzelnen Farbwerte wie bei den Eichenproben durch einen

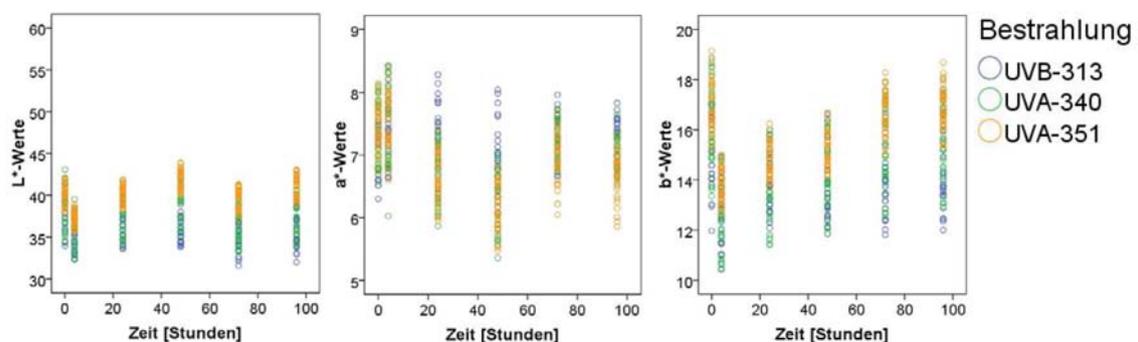
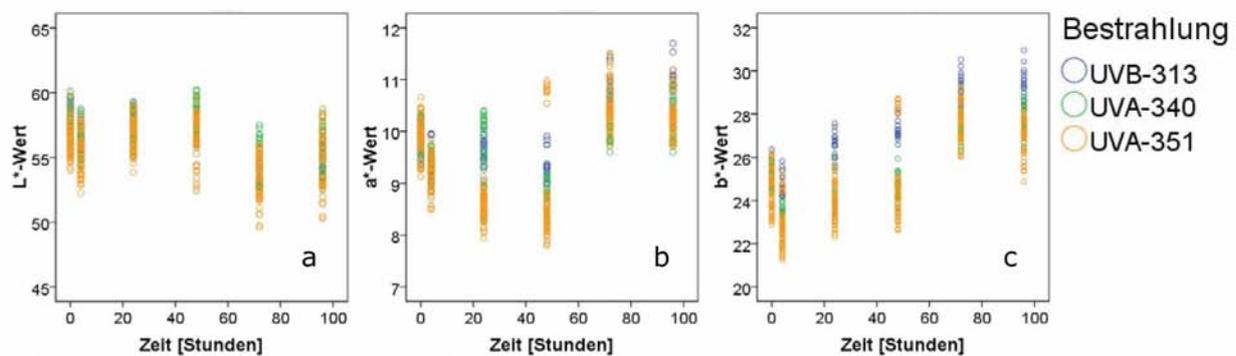


Abbildung 4.34: Vergleich der L*, a*- und b*-Werte von thermisch modifizierter Edelkastanie bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

Auswaschungsprozess konnte bei einer 2-stündigen Kondensationsphase nicht festgestellt werden. Bei den b*-Werten konnte ein vergleichbarer Trend ermittelt werden. Diese Untersuchung zeigt unbefriedigende Ergebnisse bei der Simulation der natürlichen Farbänderungen durch gefilterte Sonnenstrahlung mittels UV-Strahlung.

Esche Behandlungsstufe leicht



Esche Behandlungsstufe stark

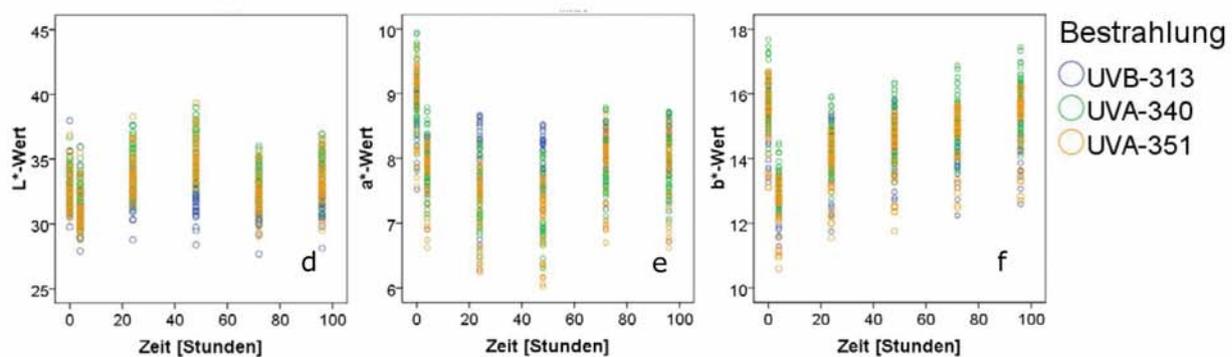


Abbildung 4.35: Vergleich der L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte von thermisch modifizierter Esche bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten

4.4.3 Abschließende Diskussion der Simulation der Verfärbungen von Holzoberflächen im Innenraum

UV-Licht wird als ein wichtiger Faktor für die Farbveränderungen von Holzoberflächen verstanden (Sandermann und Schlumbom 1962b). Dies konnte durch die Ergebnisse dieser Arbeit unterstrichen werden. Des Weiteren wurden die Anwendungsmöglichkeiten der verschiedenen UV-Lampen für die Simulation von gefilterter Sonnenstrahlung gezeigt.

Der Einsatz von 3 Lampentypen sowie der Glasfilterung brachten unterschiedliche Farbveränderungen. Dadurch ergeben sich einzelne Wellenlängenbereiche des Lichtes, die auf die Holzoberfläche einwirken. Die Δ -Farbwerte (L*, a*, b*) veränderten sich in Abhängigkeit der erzeugten Lichtwellenlänge, bei etwa 340 nm wurden die größten Farbveränderungen bei den L*- und b*-Werten festgestellt (Devantier et al. 1993). Kataoka et al. (2007) erzielten vergleichbare Ergebnisse bei der Farbänderungsintensität in einem gemittelten Bereich (Bandbreite 20 nm) von 341 nm.

Bei den verwendeten Nadelhölzern wurden gute Übereinstimmungen zwischen natürlicher Bestrah-

lung und künstlicher Bestrahlung ermittelt. Bei einem Vergleich zwischen den Farbparametern von Simulation und Sonnenbestrahlung wurde deutlich, dass eine gute Annäherung der einzelnen Farbwerte von L^* , a^* und b^* zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt. Deshalb müsste bei weiteren Umweltsimulationen der jeweils zu erreichende Wert eines Farbparameters definiert werden. Hierfür würde sich der b^* -Wert als Maß für die Vergilbung anbieten, da die natürlich bestrahlten Proben eine deutliche Vergilbung aufweisen.

Die Veränderungen bei den Eichenproben decken sich mit Untersuchungen von Zahri et al. (2007) sowie Arbeiten von Mitsui (2004) mit europäischer und japanischer Eiche (*Quercus crispula*) über die Verfärbungen durch UV-Strahlung und Globalstrahlung (größer 300 nm). Mitsui et al. (2004) zeigten ein Konvergieren der Veränderungsraten von ΔL^* - und Δb^* -Werten nach 60 Stunden Bestrahlung. All diese Resultate stehen aber im Gegensatz zu den Farbverschiebungen durch gefiltertes Sonnenlicht im Innenraum. Jedoch sind die Temperatur und die relative Luftfeuchte in den verwendeten Bestrahlungsgeräten nicht frei wählbar, sondern abhängig von den Umgebungsbedingungen und von der Lampenstrahlung. Da die Geräte nicht über eine externe Klimaanlage verfügen, sind bei einer Schwarzplattentemperatur von $67 (\pm 2)^\circ\text{C}$ eine Lufttemperatur von $62 (\pm 4)^\circ\text{C}$ und eine rel. Luftfeuchte von rund 7% während eines Bestrahlungszyklus mittels Accelerated Weathering Tester QUV gemessen worden (Schnabel 2003).

Bei den Untersuchungen von Devantier et al. (1993) mittels kurzwelligem UV-Licht bei 23°C und 50% rel. Luftfeuchte konnte ein vergleichbarer Verlauf zwischen künstlicher und natürlicher Sonnenbestrahlung bei Eiche festgestellt werden. Jedoch konnten die Endwerte der einzelnen Farbparameter nach 240 Stunden Bestrahlungszeit nicht erreicht werden. Das Probenmaterial bei beiden Versuchsreihen (von Devantier et al. (1993) und der vorliegenden Arbeit) war unterschiedlich, dies kann jedoch nicht die großen Differenzen erklären. Jedoch ist der Einfluss der Temperatur auf die Farbveränderung bei einer UV-Bestrahlung gegeben (Charrier et al. 1995).

Dieser Sachverhalt könnte unter anderem der Grund für die schlechten Ergebnisse bei der Simulation von thermisch modifizierten Laubhölzern sein. Es wird angenommen, dass in thermisch behandelten Hölzern die phenolischen Gruppen wie Autooxidantien wirken und das Lignin vor dem Abbau kurzwelliger Strahlung schützen (Ayadi et al. 2003). Sivonen et al. (2002) zeigten die Reduzierung der Bildung freier Radikale nach einer thermischen Modifikation von Kiefernholz mittels ESR-Spektroskopie. Als weiterer Effekt der Vergütung wird der Abbau von Methoxyl-Gruppen im Lignin festgestellt und durch die chemischen Reaktionen werden die Molekülgruppen des Lignins mit anderen Holzbestandteilen vernetzt. Diese neu gebildeten Bestandteile können teilweise die Entstehung lichtinduzierter freier Radikale hemmen und dadurch die Bildung von niedermoleku-

laren Degradationsprodukten verhindern. Ebenfalls werden diese Abbauprodukte schwieriger aus dem Holz ausgelaugt (Nuopponen et al. 2004). Eine weitere Erklärung der UV-Stabilität könnte die geringere Wasser- bzw. Feuchtaufnahme von thermisch behandelten Hölzern aus der Umgebungsluft sein, da mit steigendem Holzfeuchtegehalt auch die Bildung freier Radikale zunimmt (Hon und Feist 1981).

4.4.4 Einfluss der Strahlungsverteilung unterschiedlicher Lampentypen

Durch die Analyse der drei UV-Lampentypen wurden keine signifikanten Unterschiede der Verfärbungen als Auswirkung der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche bestimmt. Daher wurde der Lampentyp UVA-340 als Vergleichsstandard für die Bestimmung der Auswirkung der Steigerung der Bestrahlungsstärke und die Möglichkeit eines Xenonbogenstrahlers für die Simulation geprüft. Die ausgewählten Versuchsparameter sind im Abschnitt 3.2.3 festgelegt und beschrieben.

4.4.4.1 Eiche

Der deutliche Unterschied bei dem L^* -Wert der Eichenproben kann durch die nicht einheitliche Probenausrichtung erklärt werden (Abbildung 4.36). Die Helligkeitswerte an tangentialer Schnittfläche sind niedriger als auf der radialen Fläche. Die Proben mit dem Fladerschnitt sind aus einer Fußbodenproduktion entnommen. Die Proben unterschiedlicher Herkünfte zeigen ein vergleichbares Verhalten bei den Farbänderungen und sind für eine Feststellung der Änderungstendenzen ausreichend. Die Farbänderung bei der Simulation 1 zeigt Unterschiede zur Simulation 2. Beide Versuchsreihen sind mit UVA-340 Lampen durchgeführt worden, jedoch ist die Bestrahlungsenergie bei der 2. Simulation höher (Abschnitt 3.2.3). Durch den gesteigerten Energieeintrag wurden die größten Veränderungen bei allen drei Farbparametern festgestellt und zeigen einen Einfluss der zugeführten Energie. Damit stehen diese Ergebnisse im Widerspruch zu Untersuchungen von Mitsui (2004), der vermutete, dass nur die Bestrahlungszeit für die Farbveränderung bei der Japanischen Eiche (*Quercus crispula*) ausschlaggebend ist. Die L^* - und a^* -Werte (Simulation 1) sind durch die 2-stündige Kondensationsphase deutlichen Änderungen unterworfen. Bei der Vergilbung (b^*) wurde keine Beeinflussung durch die Holzfeuchtezunahme festgestellt. Die Simulationsvariante 3 (Xenonlicht) zeigte Differenzen bei allen drei Farbparametern zu den UV-bestrahlten Proben

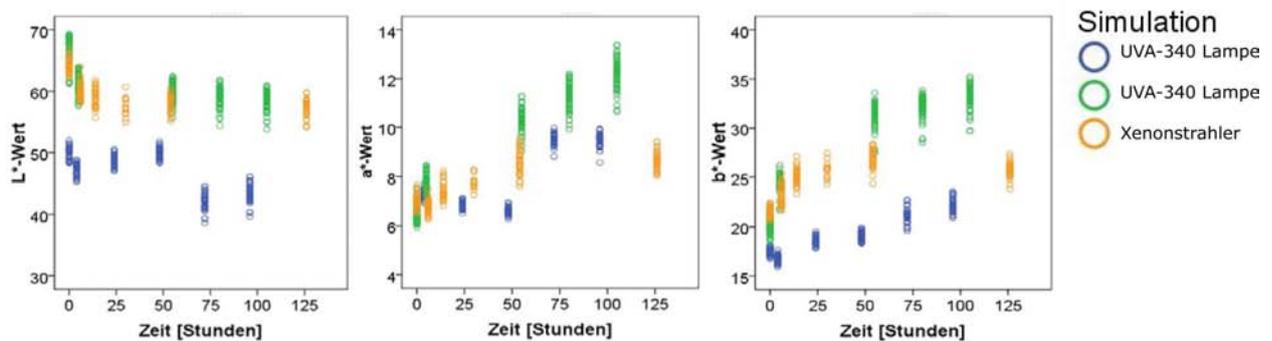


Abbildung 4.36: Einfluss der unterschiedlichen Umweltsimulationsarten auf die L*, a*- und b*-Werte von Eichenholz

und wies ein schnelles Konvergieren der Farbwerte zu einem Maximalwert auf. Die a*- und b*-Werte blieben unter den Werten der Simulation 2 (UVA-340 Lampe).

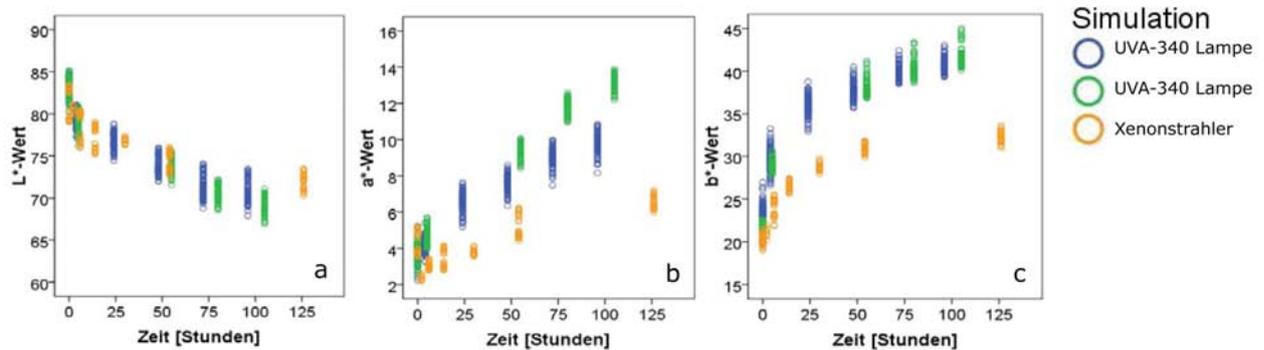
Klumpers et al. (1994) analysierten den Einfluss von den Inhaltsstoffen bei Eichenholz und den CIEL*a*b* Farbparametern und verwiesen auf eine Abhängigkeit der L*- und a*-Werte mit dem Gehalt der Tannine (Ellagitannine). Eine Abnahme der Helligkeit (L*) und eine Zunahme der Anteile des Rot-Bereichs (a*) ist durch eine Transformation von farblosen oder leicht farbigen phenolischen Inhaltsstoffen (z. B. Castalagin und Vescalagin) in farbige Bestandteile zurückzuführen. Durch hydrolytische Mechanismen werden braune Polymerisationsprodukte bei der Holz Trocknung erzeugt (Charrier et al. 1992). Zahri et al. (2007) berichteten über Farbveränderungen an Eichenholz bei gleichzeitigem Abbau von Castalagin und Vescalagin durch UV-Strahlung. Dabei wurde die Farbverschiebung durch Degradationsprodukte des Lignins nicht mitberücksichtigt, jedoch zeigten George et al. (2005) eine Beeinflussung der b*-Werte durch den Ligninabbau bei künstlicher Bewitterung. Nach der Bestrahlung (Simulation 3) wurde eine Eichenprobe im Wasser 4 Stunden gelagert und anschließend auf die Anfangsbedingungen getrocknet. Eine Veränderung aller 3 Farbparameter war die Folge, der Auswaschungsprozess betrifft demnach die Helligkeit und den Rot-Bereich sowie den Gelb-Bereich und dürfte wasserlösliche Abbauprodukte der Tannine und des Lignins entfernt haben.

4.4.4.2 Fichte und Tanne

In der Abbildung 4.37 sind die Farbveränderungen der Fichten- und Tannenproben dargestellt. Beide Holzarten weisen vergleichbare Verläufe der einzelnen Werte auf. Die Werte der Simulation 1 bei den Tannenproben streuen größer als die beiden anderen Simulationsvarianten. Dieses Verhalten

ist auf die unterschiedlicher Probenausrichtung (radialer und tangentialer Schnittrichtung) zurückzuführen.

Fichte



Tanne

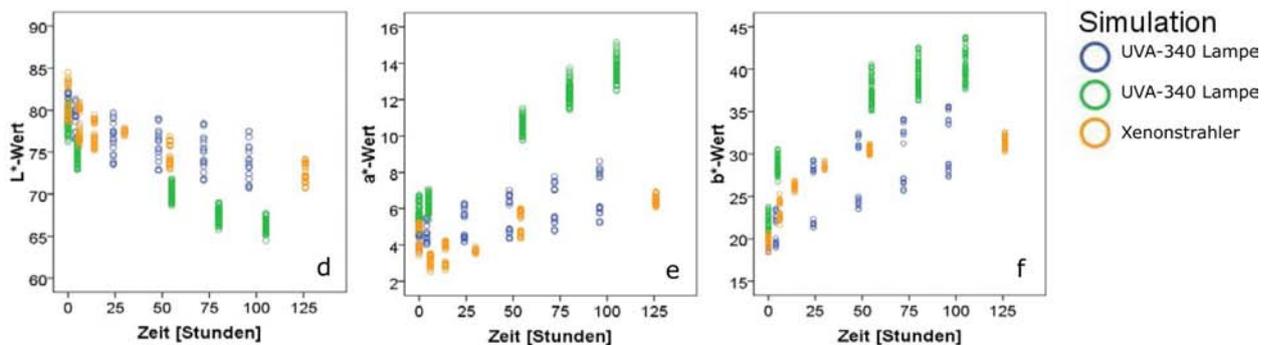


Abbildung 4.37: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten auf die L*-, a*- und b*-Werte von a-c: Fichte und d-f: Tanne

Die Helligkeitswerte aller bestrahlten Fichtenproben weisen einen vergleichbaren Verlauf und vergleichbare Intensität auf. Der a*-Wert reagiert sensitiv auf die unterschiedlichen Prozessbedingungen. Alle drei Simulationsarten können nach einer Zeitdauer von 125 Stunden unterschieden werden. Durch Bestrahlung der Proben im UV-Bereich nimmt die Veränderung im Rot-Bereich mit steigender Energie zu. Im Vergleich dazu ist ein Einfluss der Bestrahlungsstärke im UV-Bereich auf die Veränderungen im Gelb-Bereich nicht feststellbar. Beide Versuchsreihen (1, 2) weisen ähnliche b*-Werte an den Fichtenproben auf. Der beeinflussende Faktor auf die b*-Werte ist die Bestrahlungsdauer. Bei Tannenholz wurden gute Übereinstimmungen zwischen den Auswirkungen der Simulation 1 (UVA-340 Lampen) mit der Simulation 3 (Xenonlicht) festgestellt. Dies konnte aber nur teilweise auf die große Streuung der Werte aus der ersten Simulation zurückgeführt werden. Die Simulation 2 mit der höheren Beleuchtungsstärke weist die größten Veränderungen bei den Farbparametern auf. Dieses Verhalten der Tannenproben weist auf eine Beeinflussung der Farbe durch die aufgewendete Bestrahlungsenergie und der Bestrahlungsdauer hin. Demzufolge

stimmen die Ergebnisse von Mitsui (2004) über den alleinigen Einfluss der Bestrahlungsdauer bei gleichem verwendeten Lampentyp auf die Farbverschiebung bei den L*- und b*-Werten nur bei den Fichtenproben, jedoch nicht für Tanne. Bei Betrachtung der Auswirkungen der UVA-340 Lampen und des Xenonstrahlers ergeben sich durch die unterschiedlichen emittierten Wellenlängenbereiche Differenzen. Während an Tanne kein Einfluss durch die zwei Lampentypen festgestellt wurde, waren die Farbveränderungen an den Fichtenproben erheblich. Die Auswirkungen des Xenonbogenstrahlers auf die a*- und b*-Werte sind jeweils geringer als durch die UV-Bestrahlung. Durch längerwellige Lichtstrahlung (größer 450 nm) treten differenzierte Änderungen der Farbwerte und Intensitäten auf (Devantier et al. 1993). Bei Lichtbestrahlung durch einen einzelnen Wellenlängenbereich bekommen die Δ -Farbwerte negative oder positive Vorzeichen (Kataoka et al. 2007). Die Annahme einer gegenseitigen Beeinflussung der Farbreaktionen bei der Bestrahlung durch langwelliges Licht ist daher zulässig.

Bei Betrachtung der Δ -Werte über die Zeit konvergieren diese bei den a*- und b*-Werten am schnellsten. Bei bestrahlten Fichtenproben konnten gleichbleibende Farbwerte durch gefilterte Xenonstrahlung nach 60 Stunden festgestellt werden (Mitsui 2004). Durch die Verwendung von UV-Strahlung werden in kürzeren Simulationszeiten die größeren Farbveränderungen erreicht. Der Änderungsverlauf der Farbwerte ist bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen vergleichbar. Tolvaj und Mitsui (2005) verneinten die Möglichkeit der Verwendung von UV-Strahlung (unter 315 nm) für die Simulation der Einflüsse durch Sonnenlicht, obwohl sie bei Farbveränderungen hervorgerufen durch Sonnenstrahlung und künstliche Strahlung (Xenon- und UV-Strahler) bei den Ergebnissen kleine Differenzen feststellten. Bei Untersuchungen mittels DRIFT-Spektroskopie bei den bestrahlten Holzoberflächen wurden bei den Carbonyl-Gruppen der UV-bestrahlten Proben ein Peak und zwei Peaks bei den mit Sonnen- bzw. Xenonlicht bestrahlten Proben ermittelt. Sie schlossen auf eine größere Degradation des Holzes bei der Verwendung durch UV-Licht. Jedoch kann durch die Nichtberücksichtigung von veränderten Eigenschaften der Holzoberfläche (etwa Rauheit) die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft von FTIR-Spektren leiden (Faix und Böttcher 1992). Neben der Farbveränderung tritt auch eine Zerstörung des Holzgewebes durch kurzwellige UV-Bestrahlung ein (Kuo und Hu 1991) und führt zu einer Veränderung der mikroskopischen Oberflächenrauheit. Dieser Ansatzpunkt wurde von den Autoren Tolvaj und Mitsui (2005) als möglicher Einflussfaktor nicht in Erwägung gezogen.

Kataoka et al. (2007) zeigten bei der Japanischen Sichelanne (*Cryptomeria japonica* [D] Don) durch die Betrachtung der 1730 cm^{-1} Bande (nicht-konjugierte Carbonyl-Gruppe) die Photodegradation unter UV-Licht-Einwirkung. In den gemittelten Wellenlängenbereich von 310, 341 und 372

nm analysierten sie den größten photochemischen Abbau und stellten die größten Farbdifferenzen zwischen Referenzprobe und bestrahlten Proben fest. Infolgedessen besteht ein Zusammenhang zwischen der Farbdifferenz, der Bestrahlungsdauer und der Carbonyl-Gruppen-Bildung aufgrund des induzierten Ligninabbaues. Dieser Zusammenhang wurde durch die Untersuchungen von Müller et al. (2003) mit Fichtenholz bestätigt. Dieses Verhalten lässt sich auf Tannenholz im Speziellen wie auch auf andere Holzarten übertragen, da die verwendeten Holzarten einen Ligninanteil von 21-30 % aufweisen (Tabelle 2.3). Des Weiteren spielen die Extraktstoffe bei den Verfärbungen eine wichtige Rolle und können diese Farbverschiebungen teilweise verzögern oder auch beschleunigen (Pastore et al. 2004). Einerseits weisen Holzinhaltstoffe teilweise phenolische Moleküle auf, andererseits werden unter anderem phenolische Moleküle als Radikalfänger und UV-Stabilisatoren für Beschichtungen auf Holzoberflächen verwendet (Hayoz et al. 2003a).

4.4.4.3 Douglasie und Lärche

In Abbildung 4.38 sind die Farbverschiebungen der Douglasien- und Lärchenproben bei drei unterschiedlichen Bestrahlungsvarianten dargestellt. Die Versuchsreihe 1 wurde bei Douglasie nicht durchgeführt.

Die Simulationsvarianten 1 und 2 zeigen bei den Lärchenproben mit Ausnahme der b^* -Werte die gleichen Änderungswerte pro Zeiteinheit. Die reduzierte Bestrahlungsenergie (Simulation 1) lässt die b^* -Werte nach 96 Stunden zu einem Maximum konvergieren und bei höherer Strahlungsenergie ist eine leichte Abflachung der Änderungsrate erkennbar. Die Änderung der Helligkeit ist bei allen Simulationen vergleichbar. Jedoch weichen die Farbverschiebungen im Rot- und Gelb-Bereich in Abhängigkeit der verwendeten Lampentypen ab. Während durch die Xenonlichtbestrahlung die a^* -Werte der Douglasie und Lärche abnahmen, steigerten sich die Werte durch reine UVA-Bestrahlung. Die Veränderung des a^* -Wertes bei Lärchenholz steht im Zusammenhang mit dem Gehalt an phenolischen Gruppen in den Extraktstoffen (Gierlinger et al. 2004). Bei Douglasie könnte dies vergleichbar sein, da Dellus et al. (1997) angaben, bei Analysen über die phenolischen Gruppen im Kernholz eine „orange-braune“ Flüssigkeit extrahiert zu haben. Dieser Zusammenhang impliziert chemische Reaktionen in den Extraktstoffen der beiden Holzarten in Abhängigkeit der verwendeten Wellenlänge. Vorstellbar sind Reaktionen einzelner Bestandteile, die bei unterschiedlichen Wellenbereichen des Lichtes gestartet werden und abhängig davon Bestandteile mit geringer oder kräftiger Farbinintensität erzeugen. Diese Vermutung wird durch Untersuchungen von Béarnais Barbry et al. (1999)

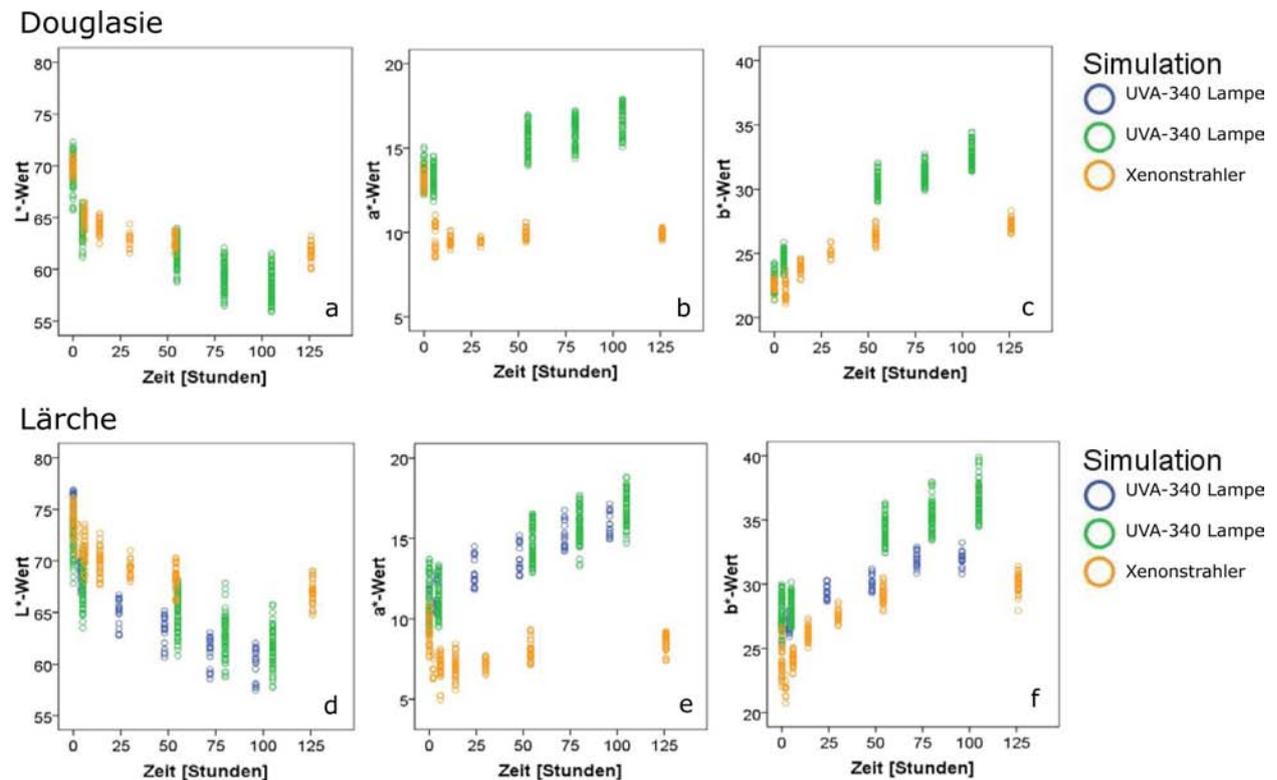


Abbildung 4.38: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten auf L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte von a-c: Douglasie und d-f: Lärche

gestützt.

Die Steigerung der b^{*}-Werte war bei Xenonlicht weniger und erreichte ab einer Bestrahlungszeit von 55 Stunden einen stabilen Wert. Die verringerte UV-Strahlungsenergie bei Simulation erreichte die zweithöchsten b^{*}-Werte und zeigte eine starke Abflachung der Änderungsraten bei 72 Stunden Bestrahlung. Bei der Simulation 2 wurden die größten Änderungen der b^{*}-Werte festgestellt. Der positive Änderung der b^{*}-Werte kann durch die Bestrahlungsenergie im UV-Bereich gezielt beeinflusst werden.

Eine abschließende Lagerung eines Probenabschnittes von Douglasie und Lärche im Wasser für 4 Stunden und anschließende Trocknung auf die Ausgangsbedingungen zeigte nur wenig Farbänderung. Dieses Verhalten führt zur Annahme, dass der wesentliche Bestandteil der Chromophoren aus Oligomeren besteht und in der Zellwand fixiert ist (Tolvaj und Faix 1995).

4.4.5 Zusammenfassende Betrachtung über die Auswirkungen der Lichtstrahlung auf Holzoberflächen

Im Innenbereich belastet in der Regel nur eine Bestrahlung mit Licht die Holzoberfläche, da eine Auswaschung normalerweise ausgeschlossen werden kann. Deshalb wurden die Auswirkungen der gefilterten Sonnenstrahlung auf Oberflächen verschiedener Holzarten über einen Zeitraum von einem Jahr untersucht. Alle Proben zeigten eine unterschiedliche Intensität der Vergilbung. Während die Nadelhölzer insgesamt eine dunklere Farbgebung aufwiesen, wurden die Eiche und die thermisch behandelten Proben heller. Änderungen im Rot-Bereich wurden nur bei den Nadelhölzern wahrgenommen. Eine gute Übereinstimmung der Veränderungen konnte zwischen den Remissionsgraden und den CIEL*a*b* Farbkoordinaten gefunden werden. Ein Vergleich zwischen einem 2- und 3-scheibigen Fenstersystem ließ deutliche Unterschiede erkennen.

Die UV-Strahlung ist ein entscheidender Faktor bei der Farbverschiebung und Farbveränderung von Holzoberflächen. Jedoch sind in der Literatur unterschiedliche Angaben und Ergebnisse über die Simulation des Einflusses von Sonnenlicht und von gefiltertem Sonnenlicht mittels UV-Strahlung zu finden (Schöftner 1989; Mitsui 2004; Tolvaj und Mitsui 2005). Voruntersuchungen mit zwei unterschiedlichen Dicken von Gläsern konnten eine Verfärbung mit gefilterter UV-Strahlung an Tannenholz zeigen. Diese Verfärbungen sind vergleichbar mit Farbverschiebungen von ungefilterter UV-Strahlung und gefiltertem Sonnenlicht. Danach erfolgte ein Vergleich von den Farbverschiebungen während der natürlichen Beleuchtung hinter Glas und der künstlichen UV-Bestrahlung im QUV-Testgerät. Bei den Nadelhölzern konnten während der Simulation vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, bezogen auf die Holzverfärbungen hinter Glas. Bei den Laubhölzern wurden Differenzen zwischen der Simulation und der Wirklichkeit festgestellt. Zum einen konnten die erforderlichen Parameter für Temperatur und rel. Luftfeuchte nicht eingehalten werden, zum anderen gelten die thermisch behandelten Proben als besonders UV-stabil (Ayadi et al. 2003).

Bei einem Vergleich unterschiedlicher Simulationsvariationen wurden Differenzen bei den Änderungen der Farbe festgestellt. Durch Xenonlicht bestrahlte Proben weisen geringere Farbunterschiede auf als durch UV-bestrahlte Proben. Beispielsweise reduzierten sich die a^* -Werte (Rot-Bereich) bei Douglasie und Lärche. Dies führte zu einer deutlichen Wahrnehmung der Vergilbung. Bei allen fünf Holzarten konnten Intensitätsunterschiede bei einem oder mehreren Farbparameter durch die Erhöhung der Bestrahlungsenergie im UV-Bereich ermittelt werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass durch die Wahl der Lampentypen (Wellenlängenbereich) und der Bestrahlungsenergie die Art und Intensitäten der Farbverschiebungen an Holzoberflächen beeinflusst werden können. Je nach

Forschungsfragen und Zielsetzung kann die gewünschte Veränderung erreicht werden.

4.5 Veränderungen im Außenbereich

Die Ergebnisse der Untersuchungen über die Veränderungen im Außenbereich beziehen sich auf einen Beobachtungszeitraum von 2 Jahren.

4.5.1 Mikroskopische Beurteilung der Veränderungen von Holzoberflächen während der Freibewitterung

Es handelt sich um einzelne Beobachtungspunkte an Holzoberflächen des 3. Bewitterungsversuches.

Douglasie

Die mikroskopische Aufnahme zu Beginn der natürlichen Bewitterung zeigt einen feinen Riss im zweiten oberen Jahrring, markiert mit einem Pfeil (Abbildung 4.39) und könnte auf eine Vorschädigung bei der Holzverarbeitung zurückzuführen sein, beispielsweise verursacht durch den Trocknungsprozess (Sandberg 2005). Die Abbildungen im Zeitraffer verdeutlichen aber keine merkliche Vergrößerung des Risses durch die Bewitterung. Größere Rissbreiten wurden an der Jahrringgrenze festgestellt und kleinere Risse sind im Frühholz wahrnehmbar. Nach 366 Tagen natürlicher Bewitterung vergraute der Frühholzbereich stärker als der Spätholzanteil.

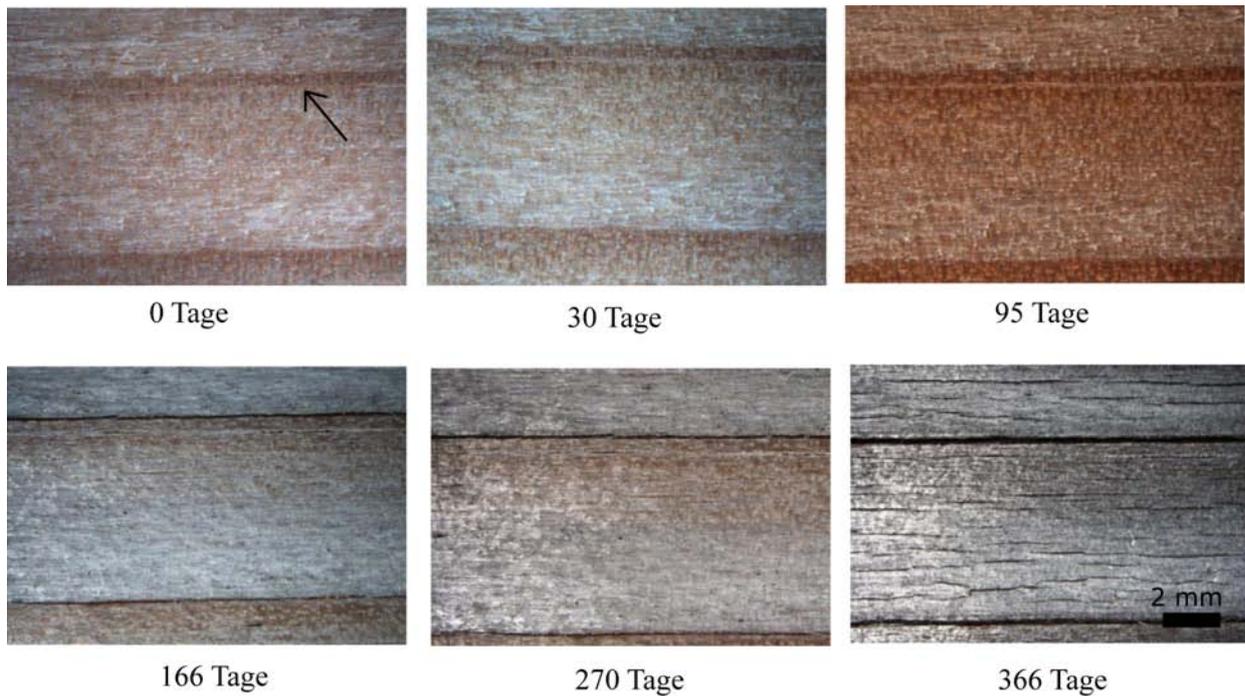


Abbildung 4.39: Mikroskopische Aufnahmen von Douglasienholz im Zeitraffer der Bewitterung, Pfeil markiert einen Riss

Eiche

Zeitlich versetzte mikroskopische Aufnahmen an einer Eichenprobe zeigen deutliche Veränderungen (Abbildung 4.40). Vor allem im Frühholzbereich und bei den Holzstrahlen ist die Rissbildung nach 166 Tagen feststellbar. Die Holzstrahlen verfärbten sich nach 270 Tagen dunkel. Nach Beendigung der Freibewitterung wies die Eichenprobe einen grauen Schleier auf.

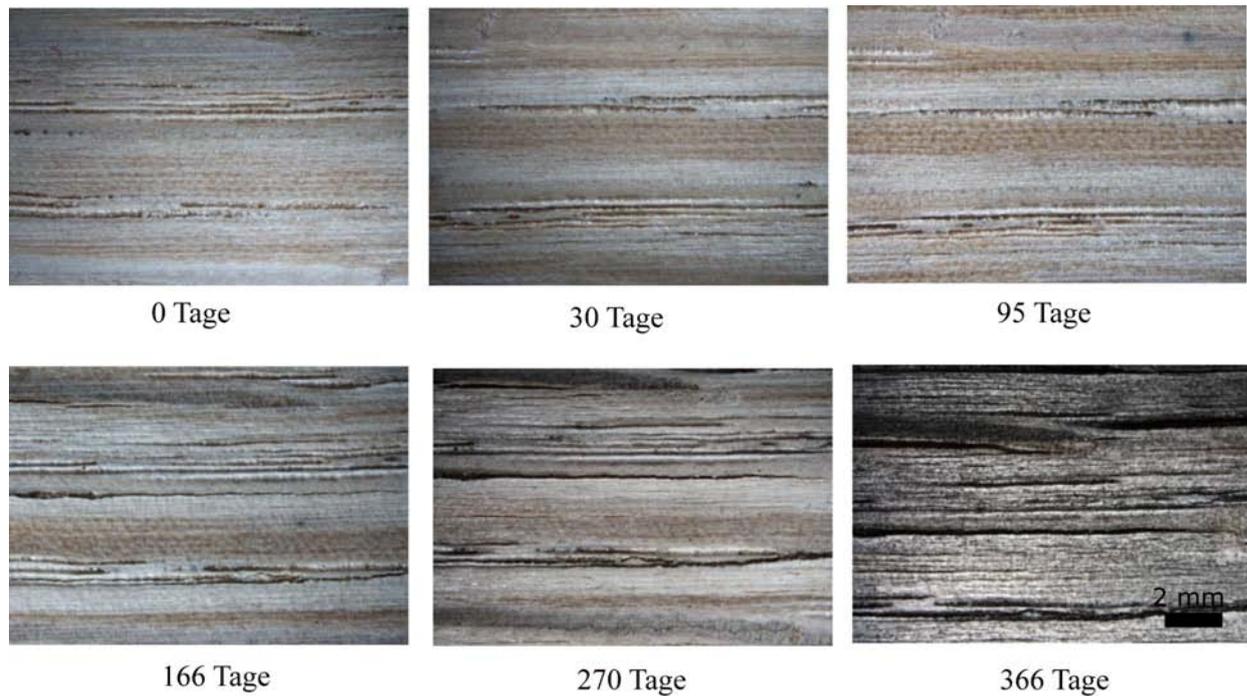


Abbildung 4.40: Mikroskopische Aufnahmen von Eichenholz im Zeitraffer der Bewitterung

Fichte

Im Spätholzanteil des Jahrringes (siehe Pfeil) wurde die Bildung eines feinen Risses nach 95 Tagen Bewitterungszeit beobachtet (Abbildung 4.41). Jedoch kam es durch die weitere Bewitterung zu keiner Vergrößerung dieses einen Risses. Ebenfalls konnte die Ausbildung von schwarzen Punkten festgestellt werden, diese können durch den Befall von Bläue- und dunkel färbenden Schimmelpilzarten erklärt werden (Sell 1968; Kühne et al. 1970). Mitunter sind diese schwarzen Punkte stark inkrustierte Kugelzellen und Zellpakete von Pilzen mit Fragmenten abgebauter Tracheiden (Butin 1991). Laut Schmidt (2006) können zwischen 100 und 250 Arten der Ascomyceten und Deutromyceten bei der Verfärbung von Holzoberflächen beteiligt sein.

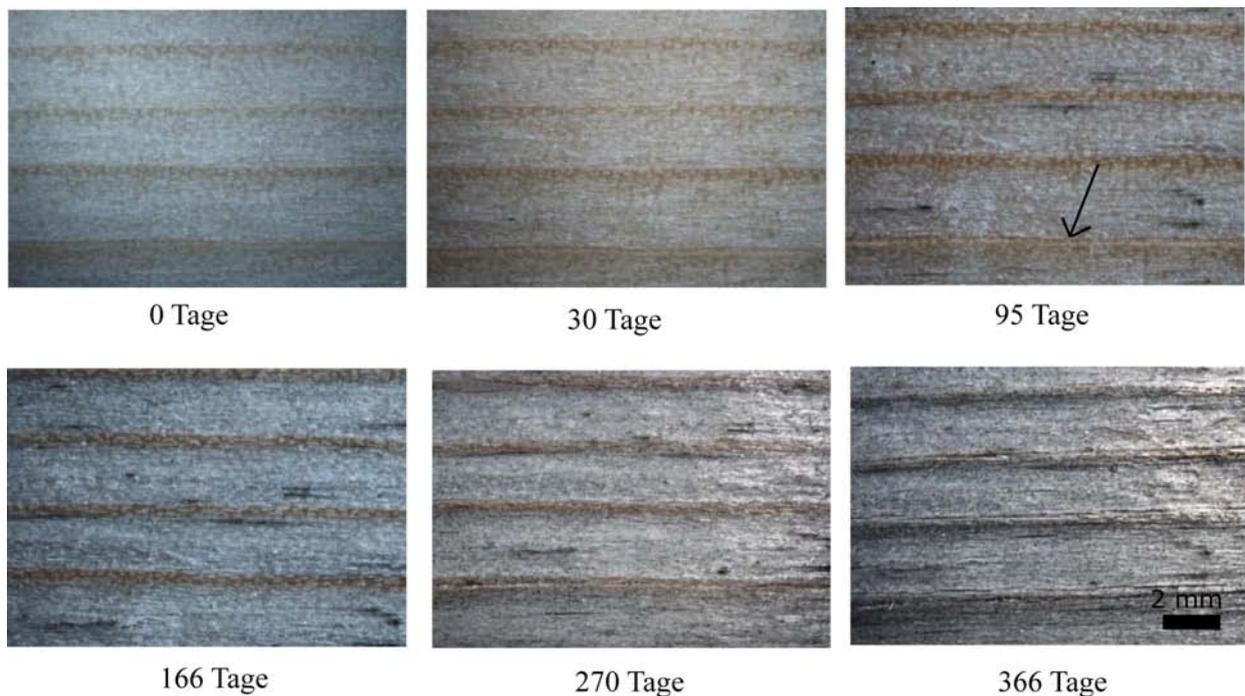


Abbildung 4.41: Mikroskopische Aufnahmen von Fichtenholz im Zeitraffer der Bewitterung, Pfeil markiert einen Riss

Der Befall an der Oberfläche wurde nur punktuell festgestellt (Abbildung 4.41 und 4.42). Diese Pilze sind fähig, Abbauprodukte des durch die Verwitterung vorgeschädigten Holzes abzubauen, stehen aber nicht im ursächlichen Zusammenhang mit dem Holzabbau (Butin 1991). Der Frühholzbereich bei Fichte vergraute am schnellsten, und nach 270 Tagen Bewitterung sind die Spätholzanteile an den Jahrringgrenzen noch deutlich sichtbar.

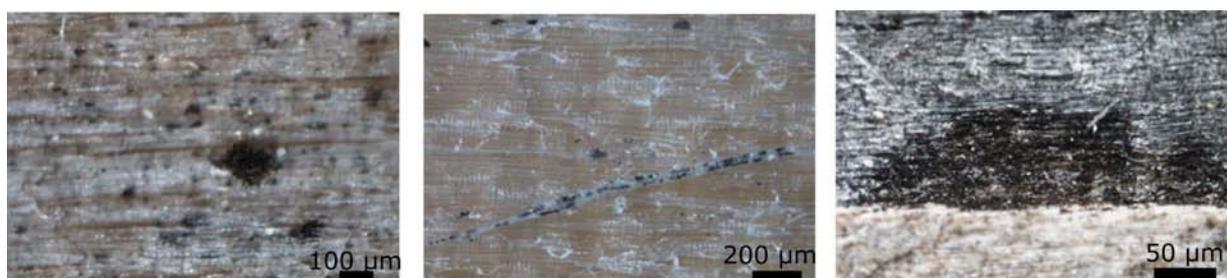


Abbildung 4.42: Mikroskopische Aufnahmen der schwarzen Verfärbungen an der Holzoberfläche, einem Befall von verfärbenden Pilzen; links: punktueller Befall, mitte: Befall einer Holzfaser, rechts: Ansiedelung der Pilze an einer Insektenfraßstelle

Lärche

Die Rissbildung entstand vermehrt bei den Übergängen der einzelnen Jahrringe (Abbildung 4.43), dabei handelt es sich vermehrt um schmale, feine Risse. Der Spätholzbereich der Jahrringe ist nach 366 Tagen noch deutlich zu erkennen, nahm jedoch auch eine dunklere Graustufe an.

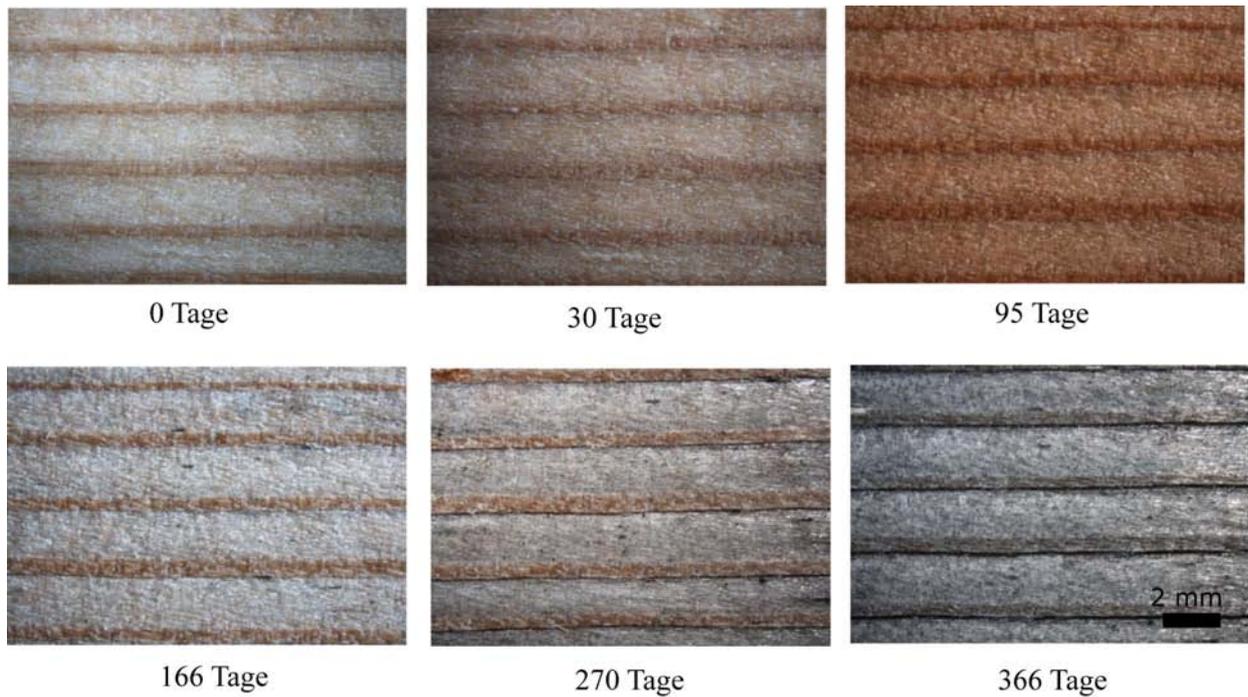


Abbildung 4.43: Mikroskopische Aufnahme von Lärchenholz im Zeitraffer der Bewitterung

Tanne

Obwohl bei den mikroskopischen Aufnahmen die Beeinflussung durch Fremdlicht vermieden wurde, konnte dies nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die unterschiedliche Farbwahrnehmung bei den Bildern zeigt diesen Einfluss (Abbildung 4.44). Nach 95 Tagen Freibewitterung sind vereinzelte schwarze Punkte zu erkennen und es wird auf einen Pilzbefall geschlossen (Abbildung 4.42). Die Risse entstanden an der Jahrringgrenze sowie vermehrt im Frühholzbereich.

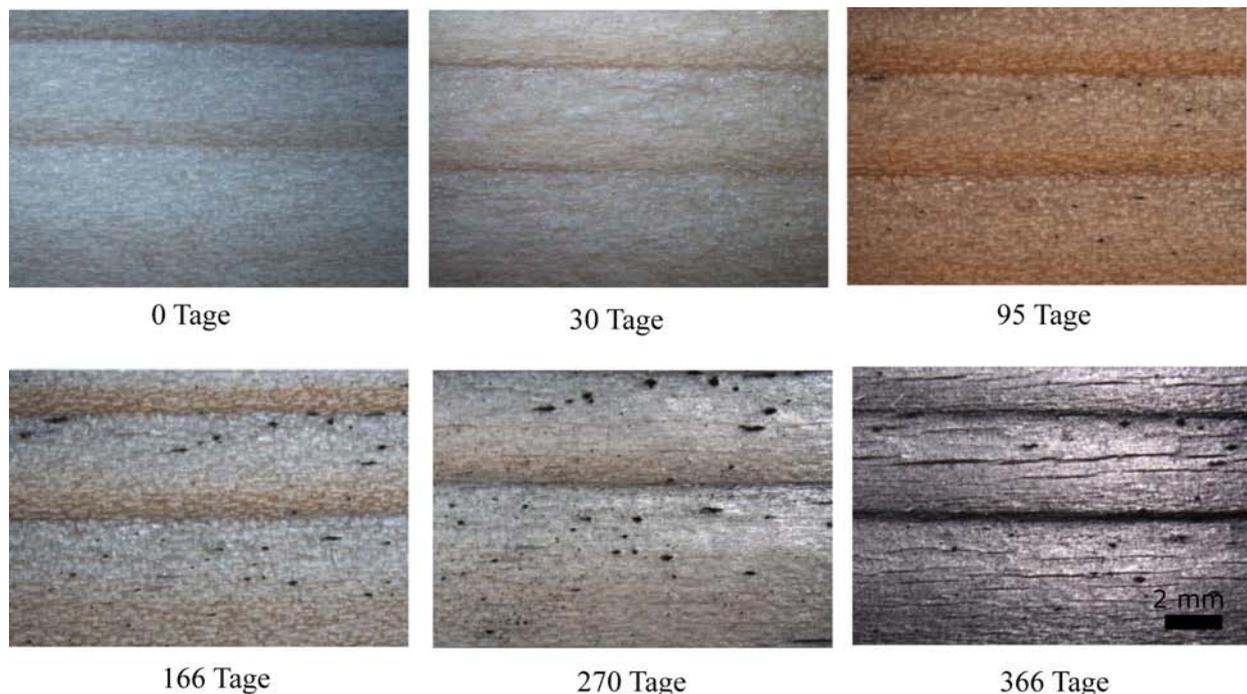


Abbildung 4.44: Mikroskopische Aufnahme von Tannenholz im Zeitraffer der Bewitterung

Die Betrachtung der ganzen Probenoberfläche zeigte andere Veränderungen als durch die mikroskopischen Aufnahmen möglich waren. Im Anfangszeitraum der Bewitterung kam es durch die Wärmeeinwirkung der Sonnenstrahlung zu einem Harzaustritt an den Oberflächen der Douglasien- und Lärchenproben.

Durch den Ligninabbau in der Mittellamelle wird der Verbund zwischen den Zellwänden zerstört (Evans et al. 2008; Kuo und Hu 1991), dadurch können sich einzelne Faserbündel von der Zellmatrix lösen. Bei Eichenholz war diese Heraustrennung der Faserverbände durch die Bewitterung nach 5 Monaten (Abbildung 4.45) feststellbar. Die kurzen Eichenfasern (1,23-1,74 mm) (Tabelle 2.2) werden durch den Niederschlag weggespült und es kam vereinzelt das hellbräunliche darunterliegende Holz zum Vorschein. Abstehende Fasern wurden bei Tannenholz nach 2 Monaten



Abbildung 4.45: Makroskopische Aufnahmen des Faserabtrags an Eichenproben

beobachtet. Alle anderen Holzarten wiesen herausgelöste Fasern nach 6-7 Monaten auf. Jedoch war dieses Phänomen nicht so stark ausgeprägt wie bei den Eichenproben, was auf längere Fasernbündel der jeweiligen Holzstruktur zurückzuführen ist. Abbildung 4.46a zeigt die Oberfläche einer Fichtenprobe nach einem Jahr und 6 Monaten mit vereinzelt helleren Bereichen der Früh- und Spätholzanteile. Dabei ist die oberste Holzschicht durch Wespen mit ihrem Kauwerkzeug abgetragen worden (Abbildung 4.46b) und die unbewitterte Holzstruktur kam wieder zum Vorschein. Ebenso sind schwarze Flecke an der Oberfläche sichtbar. Durch den Fraßprozess der Wespen und die Rissbildung entstanden Vertiefungen in der Holzstruktur, wodurch diese von Bläue- und Schimmelpilzen befallen werden konnten (Abbildung 4.42).



Abbildung 4.46: Aufnahme einer Fichtenoberfläche mit den Frassstellen, Pilzbefall und Ablagerungen (links), und Wespe bei Frasstätigkeit (rechts)

4.5.2 Analyse der Rissbildung während der natürlichen Bewitterung

Die Bewertung der Rissbildung erfolgte durch Kategorisierung und die Vermessung der Risse mittels Mikroskop (Abschnitt 3.2.4).

Kučera und Sell (1987) machten die durch Wetterbeanspruchung verursachten zyklischen Spannungswechsel und den damit verbundenen photochemischen Holzabbau für die Rissbildung im Holz verantwortlich. Auftretende Spannungsspitzen wegen unterschiedlicher Gewebeorientierung, hauptsächlich in der Grenzschicht Holzstrahl- und Grundgewebe, führen zu Rissen. Bei Betrachtung der Ultrastruktur des Holzes entwickeln sich Risse in den Tüpfeln, die Rissvergrößerung erfolgt nach dem Fibrillenwinkel der S2-Schicht (Sandberg 1999). DouglasienSpätholz hat ein etwa 1,5 fach höheres Schwindmaß als Frühholz, dabei wird beim Schwinden das Frühholz unter Druck und Spätholz unter Zug gesetzt (Vintila 1939). Bei einem scharfen Übergang zwischen den Früh- und Spätholzanteilen entstehen Spannungsspitzen. Bei tangentialen Flächen sind die Jahrringgrenzen parallel angeordnet. Infolgedessen addieren sich die einzelnen Beanspruchungen bei wechselnden Holzfeuchten und führen zu einer größeren Rissbildung (Sandberg 1999).

Den Ergebnissen der Bewertung der Rissentwicklung liegen die Untersuchungen von drei Bewitterungsversuchen zugrunde. Ein Unterschied zwischen den Standorten Kuchl und Berchtesgaden konnte nicht ermittelt werden. Nach einem Monat Freibewitterung konnten bereits die ersten Risse bei allen Holzarten festgestellt werden, diese wurden in die Klassen 1 und 2 eingeteilt (Tabelle 4.6).

Tabelle 4.6: Bewertung der Rissbildung während natürlicher Bewitterung

Holzarten	Zeitabstände zwischen den Bewertungen				
	1 Monat	3 Monate	6 Monate	9 Monate	12 Monate
Douglasie	2	2	3	3	3
Eiche	1	1	2	3	3
Fichte	1	2	2	3	3
Lärche	1	1	1	2	3
Tanne	1	2	3	3	3

Innerhalb einer Holzart erfolgte bei höherer Dichte eine sichtbare Rissbildung früher als bei weniger dichtem Holz, dies konnte aber durch die geringe Probenanzahl nicht weiter statistisch verifiziert werden. Jedoch deckt sich diese Feststellung mit dem Zusammenhang zwischen steigender Rohdichte und höheren Schwindwerten (Bosshard 1956) und folglich auch mit größeren Unterschieden

der Schwindmaße zwischen Früh- und Spätholz (Vintila 1939). Je geringer die Jahrringneigung an den untersuchten Brettern war, desto schneller entwickelten sich Risse. Diese Beobachtung stimmte auch mit den Untersuchungen von Sandberg (1999) überein.

Die Bewertungszahlen belegen eine unterschiedliche Anfälligkeit für die Entwicklung der Risse bei den verwendeten Holzarten. Anfängliche Unterschiede der Holzarten bei der Rissbildung gleichen sich nach einem Beobachtungszeitraum von einem Jahr aus. Auch nach einer 2-jährigen Bewitterungszeit wurden keine Risse über 1 mm Breite festgestellt, dadurch wurde die Rissbildung keiner Holzart in die Beurteilungsklasse 4 eingestuft.

Durch Voruntersuchungen von Wolf (2006) über die Rissbildung während künstlicher Bewitterungen wurde kein Zusammenhang zwischen Rissbreite und Risslänge festgestellt, da sowohl lange Risse eine schmale Breite aufweisen und für kurze Risse eine große Breite gemessen wurde.

Breite Risse werden bei der visuellen Begutachtung schnell wahrgenommen und wirken sich besonders störend aus. Deshalb wurde für die mikroskopische Rissvermessung die Rissbreite als technisch messbare Größe und aussagekräftiges Ergebnis herangezogen (Abbildung 4.47).

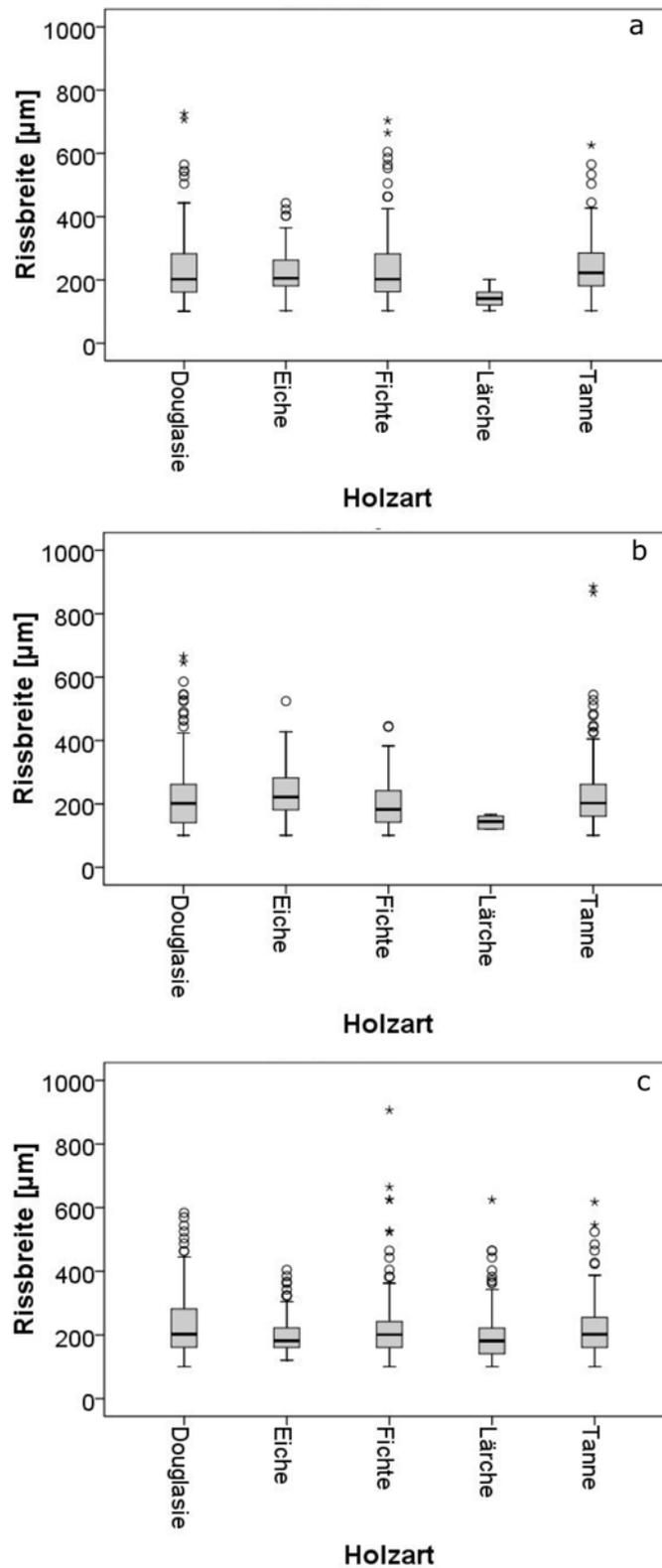


Abbildung 4.47: Auswirkungen der Witterungseinflüsse an den Bewitterungsstandorten a: Kuchl, b: Nationalpark Berchtesgaden, c: Homestead auf die Rissbildung der Holzarten nach 2-jähriger Bewitterungszeit

Die Mediane der unterschiedlichen Holzarten an gleichen Bewitterungsstandorten nach einer Prüfzeit von 2 Jahren befinden sich um $200\ \mu\text{m}$. Einzige Ausnahme sind die Lärchenproben am Standort Kuchl (a) und Berchtesgaden (b), hier sind die Mediane deutlich geringer. Die Verwitterungsercheinungen am Standort Homestead (c) zeigten eine andere Entwicklung der Risse bei Lärche, da hier deutlich mehr Risse gemessen worden sind. Visuell sind die Risse der Lärchenproben an Bewitterungsstandorten in Europa wahrnehmbar, jedoch weisen diese keine größeren Rissbreiten als $100\ \mu\text{m}$ auf und können somit mit der eingesetzten Messvorrichtung (Abschnitt 3.2.4) nicht erfasst werden. Die breiteren Risse können vermehrt durch das mildtropische warmfeuchte Klima in Florida verursacht worden sein. Ein weiterer negativer Einfluss könnte die um $7,5\ \text{cm}$ geringere Probengröße sein. Die Proben weisen vermehrt Risse bis zu den Enden auf. Vergleichswerte aus der Literatur liegen für die Holzart Lärche nicht vor.

Unterschiede bei der Verteilung der Rissbreiten konnten bei unterschiedlichen Standorten ermittelt werden. Der Mann Whitney U-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ermittelte signifikante Unterschiede bei Eiche zwischen den Standorten Berchtesgaden und Homestead, bei Fichte zwischen Kuchl und Homestead, bei Lärche zwischen Kuchl und Homestead sowie bei Tanne zwischen Kuchl und Berchtesgaden. Bei Douglasienholz wurde kein signifikanter Unterschied bei den Rissbreiten der verschiedenen Auslegungsstandorte festgestellt.

Roux et al. (1988) folgerten eine visuelle Vergleichbarkeit der Rissbildung von fünf europäischen Bewitterungsstandorten. Die Auswirkungen durch die Bewitterung an einem Standort in Nordamerika wurden nicht untersucht, deshalb kann von einer Übereinstimmung der Ergebnisse ausgegangen werden. Ein Testen der Rissverteilung der verwendeten Holzarten unterblieb aufgrund der geringen Probenanzahl und der damit verbundenen geringen Aussagekraft der Ergebnisse.

4.5.3 Feststellung der Farbveränderungen während der Freibewitterung an verschiedenen Standorten

Bei der ersten Versuchsreihe der Freibewitterung wurden an drei verschiedenen Standorten gewählt, um einen möglichen Einfluss der Standorte auf die Veränderungen der einzelnen Farbparameter (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) festzustellen. Eine einfaktorielle Varianzanalyse konnte auf Grund der Inhomogenität der Messdaten nicht erfolgen, da eine Grundvoraussetzung (Homogenität der einzelnen Varianzen) für die Varianzanalyse nicht erfüllt wird. Folglich wurde der Mann Whitney U-Test als parameterfreier Test benutzt.

In der Tabelle 4.7 sind die Ergebnisse des Hypothesentestes.

Tabelle 4.7: Ergebnis der statistischen Analyse der Farbveränderungen an Holzoberflächen nach einjähriger Bewitterungsdauer an den Standorten (1) Kuchl, (2) Berchtesgaden, (3) Homestead

Holzarten	Standorte	ΔL^*			Δa^*			Δb^*		
		1 ¹	2 ²	3 ³	1	2	3	1	2	3
Douglasie	1	-	<0,001 ⁴	<0,001	-	0,380	<0,001	-	0,290	<0,001
	2	<0,001	-	<0,001	0,380	-	<0,001	0,290	-	<0,001
	3	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	-
Eiche	1	-	<0,001	<0,001	-	0,004	<0,001	-	<0,001	<0,001
	2	<0,001	-	0,095	0,004	-	<0,001	<0,001	-	<0,001
	3	<0,001	0,095	-	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	-
Fichte	1	-	<0,001	<0,001	-	0,500	0,020	-	0,93	0,020
	2	<0,001	-	<0,001	0,500	-	<0,001	0,93	-	<0,001
	3	<0,001	<0,001	-	0,020	<0,001	-	0,020	<0,001	-
Lärche	1	-	0,240	<0,001	-	<0,001	<0,001	-	0,260	<0,001
	2	0,240	-	<0,001	<0,001	-	<0,001	0,260	-	<0,001
	3	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001	-
Tanne	1	-	0,840	0,380	-	<0,001	<0,001	-	<0,001	<0,001
	2	0,840	-	0,680	<0,001	-	0,280	<0,001	-	<0,001
	3	0,380	0,680	-	<0,001	0,280	-	<0,001	<0,001	-

¹ Bewitterungsstandort Kuchl

² Bewitterungsstandort Berchtesgaden

³ Bewitterungsstandort Homestead

⁴ signifikant

Die Werte <0,001 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten. Insofern kann nicht angenommen werden, dass die Farbveränderungen nach einem Jahr Bewitterung an diesen Standorten gleich sind. Werden die Klimadaten der Standorte verglichen, variieren die Niederschlagsmenge an den Standorten (Abbildung 3.4). Fehlende Niederschläge könnten die unterschiedliche Farbveränderung bewirken. Durch den Niederschlag nimmt die Holzfeuchte zu, dadurch können vermehrt Radikale im Holz gebildet werden (Hon und Feist 1981). Ebenfalls werden durch den Niederschlag die wasserlöslichen Abbauprodukte ausgewaschen (Evans et al. 1992). Laut Wypych (2003) ist nicht nur das Endergebnis der Prüfung zu beachten, sondern auch der Verlauf der Eigenschaftsveränderungen während der Bewitterungszeit zur Analyse heranzuziehen.

Einen Überblick der Farbveränderungen der verwendeten Holzarten im Außenbereich über 2 Jahre zeigt die Abbildung 4.48. Bei den L*-Werten (Helligkeit) verhalten sich alle Holzarten sehr ähnlich. Für die a*- und b*-Werte sind die Änderungen im Anfangsbereich unterschiedlich. Nach rund 250 Bewitterungstagen sind die Veränderungen unbedeutend und veränderten sich auch nach 732 Tagen nur unmerklich.

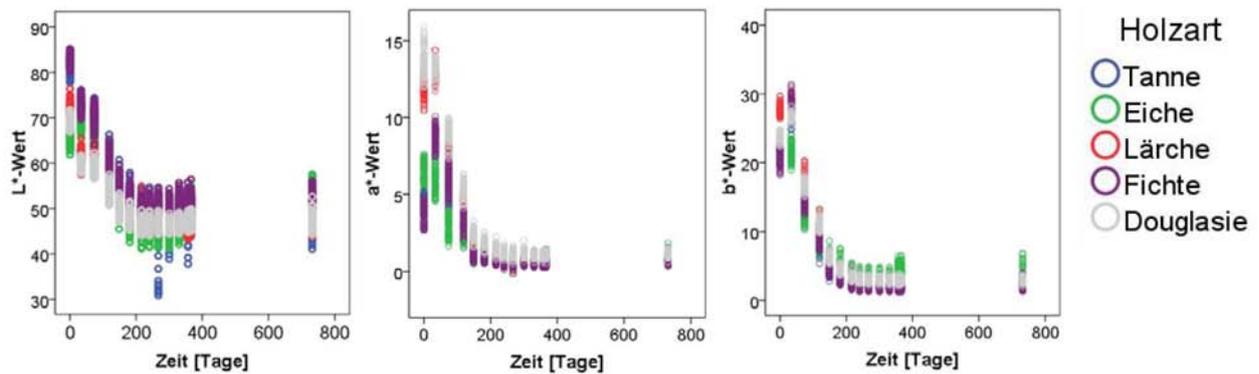


Abbildung 4.48: Farbverschiebungen der L*-, a*- und b*-Werte für die einzelnen Holzarten über eine Bewitterungszeit von 2 Jahren am Standort Kuchl

Die Abbildung 4.48 zeigt aber auch die Schwierigkeit solcher Analysen über die Zeit. Ein Vergleich von unterschiedlichen Materialien ist ohne geeignete Methoden nicht sinnvoll. Deshalb wurde im Abschnitt 4.5.4 eine Methode zur Modellierung von Datensätzen über die Zeit entwickelt. Diese kann für die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Holzarten und Bewitterungseinflüssen verwendet werden.

4.5.4 Modellierung der Veränderungen

Die Modellierung der Farbveränderung durch natürliche Bewitterung bei den verwendeten Holzarten wird am Beispiel der Lärchenproben am Bewitterungsstandort Kuchl gezeigt. Die einzelnen durchgeführten Überlegungen und Ergebnisse sind bei den anderen Holzarten vergleichbar.

Die Abbildung 4.49 gibt einen Überblick der gemessenen Farbparameter und der angenäherten Kurve mit verschiedenen Glättungsfaktoren (0,3, 0,5 und 0,7). Die Datenpunkte zeigen eine geringe

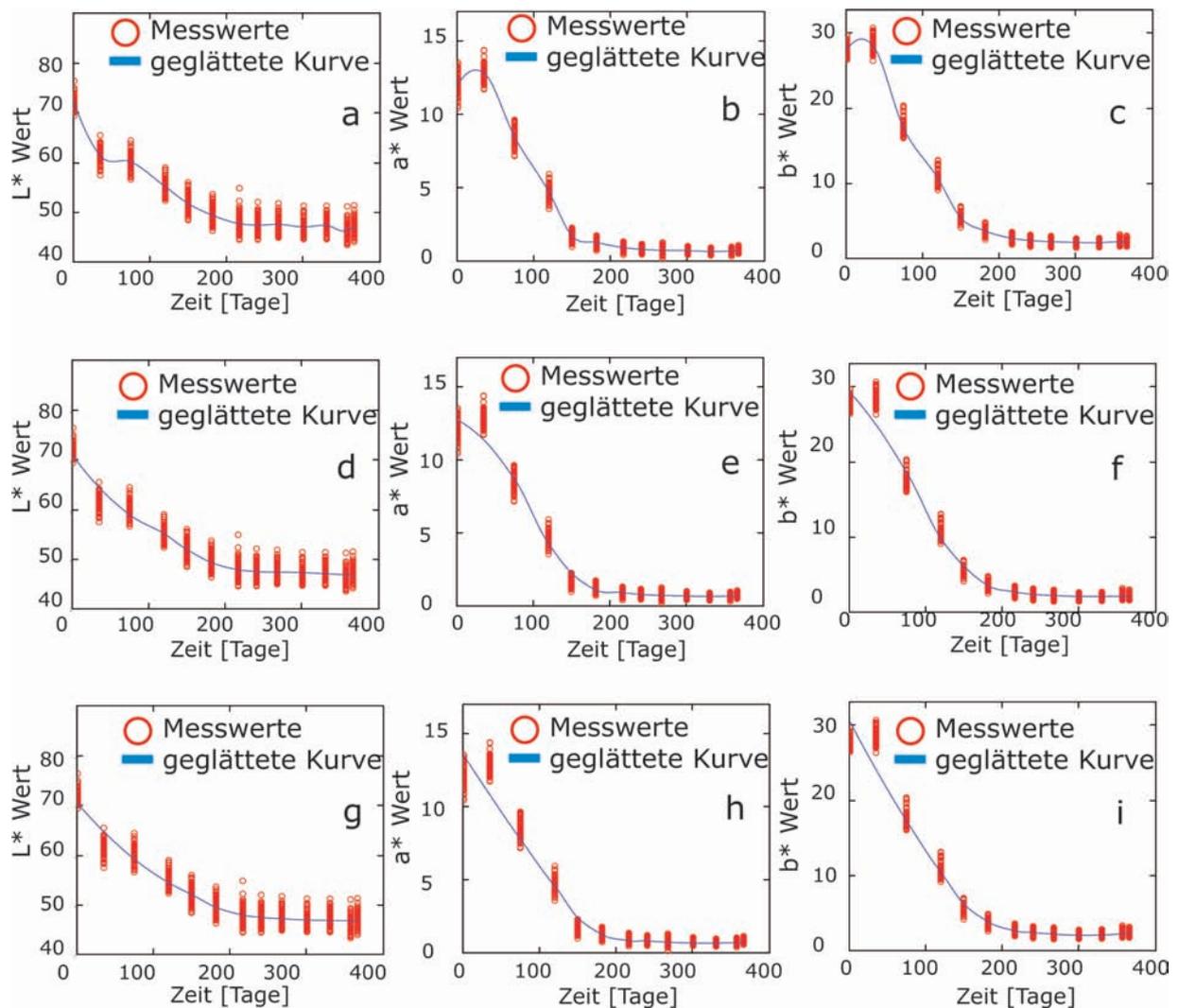


Abbildung 4.49: Messdaten der L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte der Lärche vom Bewitterungsstandort Kuchl mit den geglätteten Kurven mit unterschiedlichen Glättungsfaktoren a-c: 0,3, d-f: 0,5 und g-i: 0,7

Streuung innerhalb einzelner Messungen über die Zeit auf. Dadurch kann ein Verlauf der Farbän-

derungen beobachtet werden und Methoden für eine Schätzung der Veränderungen können eingesetzt werden. Eine visuelle Begutachtung, wie sie von Guseva und Lichtblau (2005) vorgeschlagen wurde, weist den Glättungsfaktor 0,3 als beste Anpassung aus. Alle gemessenen Farbparameter über die Bewitterungszeit werden durch die Kurve repräsentiert. Die Glättungsfaktoren 0,5 und 0,7 beschreiben die Verläufe der a^* - und b^* -Werte nicht ausreichend.

Für die Analyse des relevanten Modells wurden die Differenzen zwischen den gemessenen Farbparametern und den geglätteten Kurvenpunkten (Glättungsfaktor 0,3) berechnet (Abbildung 4.50). Die errechneten Differenzen verteilen sich um Null und zeigen somit eine gute Anpassung an. Die Residuen zwischen dem Schätzparameter und den Messdaten sind normalverteilt, ermittelt durch den Kolmogoroff-Smirnov-Test auf Basis eines Signifikanzniveaus von 5%. Dadurch scheint

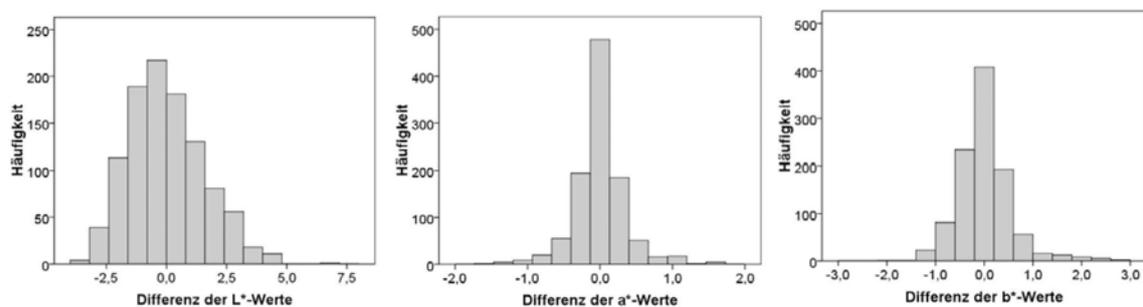


Abbildung 4.50: Absolute Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen den gemessenen und geglätteten Farbparametern mit Glättungsfaktor 0,3

kein systematischer Fehler bei der Modellierung der Farbveränderung zu entstehen (Mandel 1984). Abbildung 4.51 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Farbparameter und die Grenzen des 99%-Konfidenzintervalls für die einzelnen Farbparameter. Der Mittelwert liegt immer zwischen der oberen und unteren Grenze des Vertrauensbereiches. Dadurch können die Daten durch das Konfidenzintervall (Konfidenzband) dargestellt werden (Abbildung 4.52).

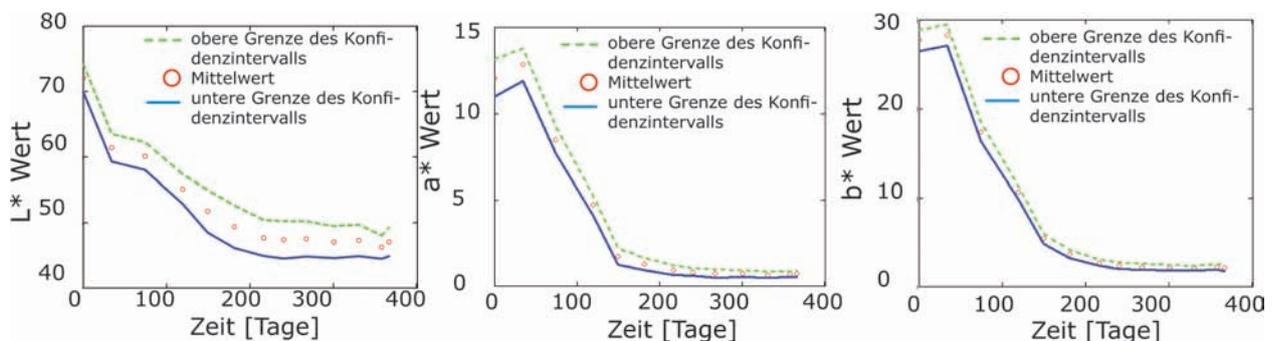


Abbildung 4.51: Mittelwerte und die obere und untere Grenzen der 99%-Konfidenzintervalle der Lärchenproben

Diese Banddarstellung des Konfidenzintervalls wurde für die weitere Auswertung der unterschiedlichen Einflüsse der Prozesse verwendet. Infolgedessen ist eine aussagekräftige Beurteilung der Farbverschiebungen über die Zeit möglich. Weisen beispielsweise zwei verschiedene Prozesse eine exakte Überlappung der einzelnen Konfidenzbänder auf, so sind die Auswirkungen beider Prozesse auf die Materialeigenschaften vergleichbar. Vereinzelt wurden bei den einzelnen Freibewitterungsversuchen und der Umweltsimulation Ausreißer der Farbwerte festgestellt. Durch die lokale gewichtete Regressionsanalyse konnten diese Einflüsse auf den Schätzparameter minimiert werden. Jedoch weisen die Konfidenzintervalle sprunghafte Veränderungen auf.

Bei der Darstellung von mehreren Konfidenzintervallen in einer Abbildung werden die Bänder teilweise überdeckt. Dieses Verhalten ist auf das verwendete Programm zurückzuführen. Daher sind die unterschiedlichen Varianzen der Farbparameter nicht erkennbar.

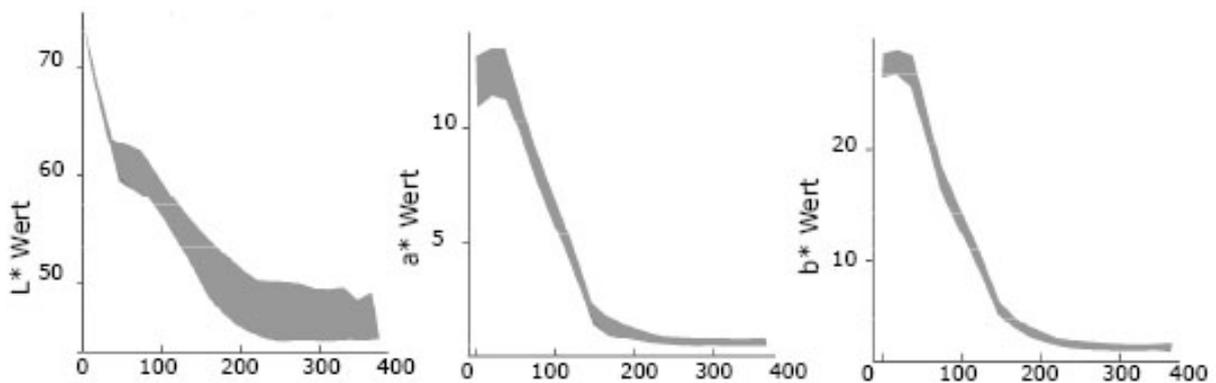


Abbildung 4.52: Mittelwerte der gemessenen Farbdaten mit den oberen und unteren Grenzen der 99%-Konfidenzintervalle der Lärchenprobe

4.5.5 Einfluss der Witterung auf die Farbverschiebung unterschiedlicher Holzarten

Die Darstellung der einzelnen Farbparameter erfolgt in Form von Konfidenzbändern nach der Modellierung der gemessenen Werte (Abschnitt 4.5.4). Es werden jeweils Douglasie und Lärche sowie Fichte und Tanne miteinander dargestellt. Die Eiche wurde als einzige Laubholzart separat behandelt.

Quantitative chemische Analysen zeigten eine Abnahme der phenolischen Hydroxylgruppen im Lignin durch UV-Bestrahlung sowie eine gleichzeitige Zunahme dieser chemischen Bestandteile in den wasserlöslichen Abbauprodukten bei steigender Bewitterungsdauer (Hon und Chang 1984;

Hon und Feist 1986). Dabei sind die Guaiacyl-Einheiten durch den Abbauprozess stärker betroffen als die Syringyl-Einheiten des Lignins (Colom et al. 2003). Bei den Polyosen zeichnet sich ein vergleichbares Verhalten ab. Der Xylose-Gehalt bei Laubholz und der Mannose-Gehalt bei Nadelholz zeigten eine Abnahme nach natürlicher und künstlicher Bewitterung (Sudiyani et al. 1999). Nach wässriger Extraktion bewitterter Kiefernproben (*Pinus radiata*) wurde Glucose im Extrakt nachgewiesen und auf eine Degradation von Cellulose und Polyosen geschlossen (Evans et al. 1992). Diese Annahme wurde durch Analysen des Holocellulose-Gehaltes bestätigt. Dabei wird die Cellulose im amorphen Bereich stärker abgebaut, dies wurde mittels NMR (Nuclear magnetic resonance) Analysen festgestellt (Nuopponen et al. 2004). Eine Beeinflussung der Polyosen im amorphen Bereich der Mikrofibrillen kann aber nicht ganz ausgeschlossen werden. Die Deacetylierung der Polyosen wurde als Hauptreaktion des Abbauprozesses ermittelt (Nuopponen et al. 2004). Jedoch sind die Bereiche der kristallinen Cellulose gegenüber den Witterungseinflüssen stabiler als Polyosen und Lignin (Colom et al. 2003). Auf dieses Verhalten kann infolge des hohen Celluloseanteils an bewitterten Holzoberflächen geschlossen werden (Kleinert 1970; Sudiyani et al. 1999).

Tsuchikawa et al. (2004) und Wu et al. (2005) zeigten einen signifikanten Zusammenhang zwischen einzelnen chemischen Gruppen der Holzbestandteile und den L^* - und b^* -Werten des CIEL^{*}a^{*}b^{*} Farbraumes bei Änderungen durch Holz Trocknung und UV-Bestrahlung. Besonders Änderungen des Absorptionsverhalten von Furanose- oder Pyranose-Einheiten der Polyosen und der aromatischen Grundstruktur des Lignins korrelieren mit den b^* - oder Δb^* -Werten. Durch Analysen der Spektren im MID (mittleren Infrarot)- und NIR (nahen Infrarot)-Bereich wurde eine sehr gute Korrelation der ersten Oberschwingung von C=C Bindungen und phenolischen O-H Bindungen mit der Bande um 1678 nm im NIR-Bereich im Lignin von Weizenstroh festgestellt (Barton et al. 1992). Michell und Schimleck (1996) zeigten ebenfalls gute Korrelationswerte zwischen nasschemischen und spektrometrischen Analysen im mittleren und nahen infrarot Bereich. Die Wellenlängenbereiche um 1668 wurden dem Lignin und 2136 nm dem Lignin und Extraktstoffen zugeordnet. Schimleck et al. (1997) und Yeh et al. (2004) benutzten die NIR-Spektroskopie für die quantitative Bestimmung von Lignin bei diesen Wellenlängen. Aufgrund dieser Untersuchungen über die Bestimmung der Holzbestandteile mittels Messungen im NIR-Bereich und in weiterer Folge der signifikanten Korrelationen zwischen Daten von NIR-Spektren mit den Farbwerten (L^* und b^*) lässt sich eine chemische Veränderung der Holzbestandteile (Polyosen und Lignin) durch die Farbverschiebung ableiten. Deshalb kann bei der Bewitterung von Holz eine Abnahme der Absorption im Wellenlängenbereich des Lignin im NIR-Bereich eine Verminderung der L^* - und b^* -Werte hervorrufen. Eine Steigerung der Farbwerte kann auf die Bildung neuer chromophorer Gruppen aus den Abbauprodukten zurück-

geführt werden (Abschnitt 4.4.4).

Der Farbton der Eichenproben wurde zu Beginn der natürlichen Bewitterung heller (Abbildung 4.53). Im Anschluss wurde das Eichenholz dunkler und ab einer Bewitterungszeit von 216 Tagen

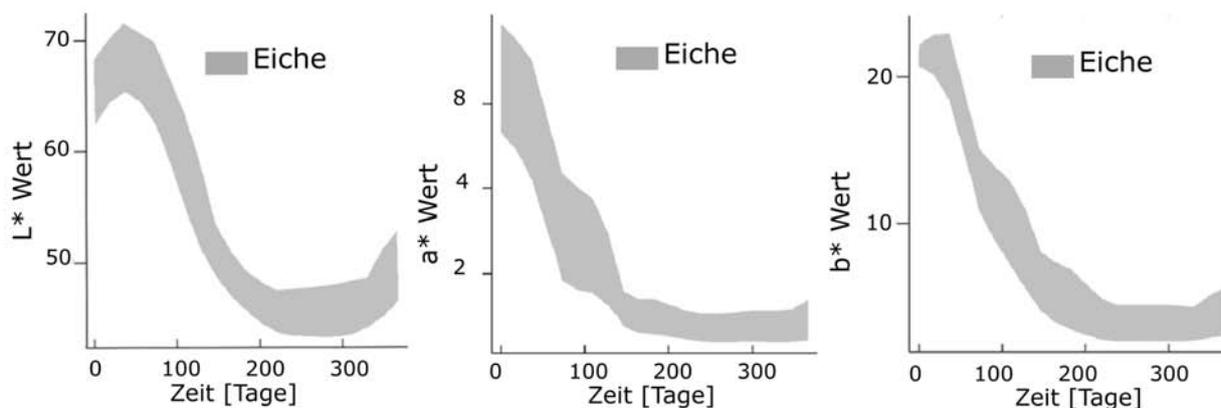


Abbildung 4.53: Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Eichenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)

kam es zu keiner weiteren wahrnehmbaren Veränderung der Helligkeitswerte. Auffällig war jedoch die Steigerung nach 300 Tagen. Dies kann auf den großflächigen Abtrag der Faserbündel der Eichenproben zurückgeführt werden (Abbildung 4.45). Dadurch wird unbewittertes Holz aus dem Untergrund freigelegt und es kommt zu einer Aufhellung, vergleichbar wie am Anfang der Bewitterungszeit.

Die a^* -Werte fallen von Beginn der Bewitterung bis zu einer Zeitdauer von 149 Tagen, danach wurden keine Veränderungen festgestellt. Der Farbton der Proben verliert an Farbtintensität und an Rot-Anteilen. Bei einzelnen Proben blieben die b^* -Werte annähernd konstant. Bei den anderen Proben wurde eine leichte Steigerung nach den ersten 34 Tagen festgestellt. Im Anschluss verminderten sich die b^* -Werte bis zu einer Zeitdauer von 216 Tagen. Durch die Reduzierung der b^* -Werte verlor die Farbe an Intensität und an Gelb-Anteilen. In weiterer Folge waren die Werte stabil. Jedoch konnte zum Ende der Prüfungsdauer eine leichte Steigerung der b^* -Werte verzeichnet werden, was auf den Abtrag der obersten Schicht zurückgeführt wurde.

Bei einer Gegenüberstellung der Farbänderungen der Douglasien- und Lärchenproben ist ein vergleichbares Verhalten feststellbar (Abbildung 4.54). Die Werte der Helligkeit (L^*) sinken von Beginn der Bewitterung steil ab und das Konfidenzband erfährt eine Abflachung zwischen 34 und 74 Tagen. In diesem Zeitraum wurden keine extremen Witterungsbedingungen, wie lange Schönwetterperioden oder sehr niederschlagsreiche Tage, festgestellt. Danach nehmen die L^* -Werte ab und erreichten nach 216 Bewitterungstagen das Minimum. Im Anschluss waren keine großen Verände-

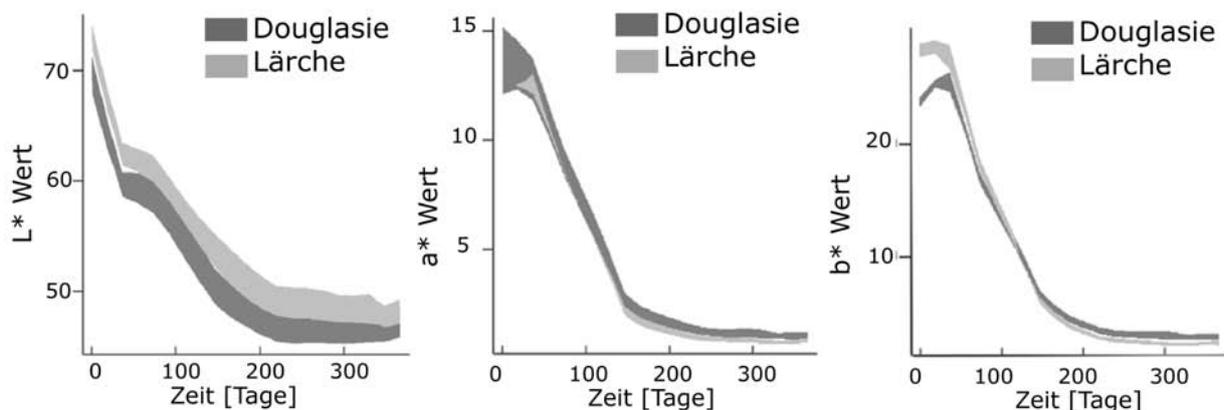


Abbildung 4.54: Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Douglasien- und Lärchenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)

lungen mehr wahrnehmbar. Bei Betrachtung beider Konfidenzbänder der L^* -Werte weist die Lärche eine größere Helligkeit auf.

Die Bänder der a^* -Werte sind über den Großteil der Bewitterungszeit überlappend und somit nicht signifikant unterschiedlich. Bei den Douglasienproben waren die a^* -Werte in den ersten 34 Tagen konstant. Im Anschluss verminderten sich die Werte kontinuierlich und nach 216 Tagen wurde ein annähernd stabiler Wert erreicht. Die Proben verloren an Farbintensität und an Rot-Anteilen. Die Verschiebungen im Rot-Bereich waren bei den Lärchenproben sehr ähnlich. Jedoch am Beginn der Bewitterung zeigten die Proben unterschiedliche Farbverschiebungen. Die Werte einiger Messpunkte verminderten sich, wiederum andere steigerten sich.

Abgesehen von den unterschiedlichen Ausgangswerten waren die Änderungen im Gelb-Bereich (b^* -Werte) bei Douglasien- und Lärchenproben vergleichbar. Nach einer anfänglichen leichten Steigerung fielen die Werte radikal ab, bis sie ihr Minimum nach 216 Tagen erreichten. Damit ist auch die Vergilbung zu Beginn nicht mehr feststellbar. Die Holzfarbe verlor an Intensität und an Gelb-Anteilen.

Bei Betrachtung der Konfidenzbänder der einzelnen Farbparameter für Fichten- und Tannenproben können Ähnlichkeiten festgestellt werden (Abbildung 4.55). Die Werte der Helligkeit fallen von Beginn ab und erreichen nach 216 Tagen ihr Minimum. Die große Breite des Konfidenzintervalls der Tannenproben bei 267 Tagen kann auf Ausreißer der L^* -Werte von zwei Proben zurückgeführt werden. Diese Beobachtung stimmt mit den hohen Holzfeuchtwerten beider Proben überein, die zwischen 25 und 40% lagen, während die anderen Proben Holzfeuchtwerte unter 20% aufweisen. Die Farbmessungen wurden an trockenen Oberflächen durchgeführt, jedoch kann der innere

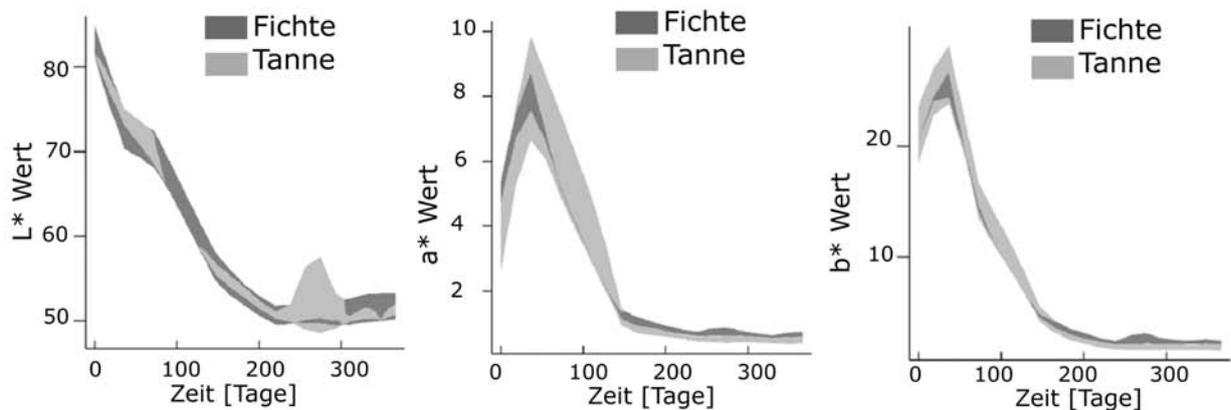


Abbildung 4.55: Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Fichten- und Tannenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)

Kern der Probe einen höheren Feuchtegehalt aufweisen. Bei der Betrachtung eines oberflächlichen Abtrocknungsprozesses konnten bei den zwei Proben Feuchtenester entdeckt werden (Abbildung 4.56). Solche Feuchtenester sind bei Tanne bekannt und werden durch den Naßkern verursacht. Freies Wasser in den Zellen beeinflusst die Holzfarbe (Hon und Minemura 2001) und könnte die hohe Streuung der L*-Werte erklären.



Abbildung 4.56: Tannenprobe mit oberflächlichem Abtrocknungsprozess, wobei ein Streifen noch feucht ist und als dunkler Streifen wahrgenommen wird

4.5.5.1 Einfluss des Auslegungszeitpunktes auf die Veränderungen an Holzoberflächen

Die Variation der Sonnenscheinstunden über ein Jahr wird meist sehr deutlich wahrgenommen. Daneben ändert sich auch die jahreszeitliche Bestrahlungsstärke der Sonne, im Juni oder Juli er-

reicht sie ihren Höhepunkt und im Januar oder Dezember ihren Tiefpunkt, wird aber durch die Bewölkung stark beeinflusst (Blumthaler et al. 1996).

Für die Prüfungen der Materialeigenschaften durch natürliche Bewitterung und deren Vergleichbarkeit werden die Proben bei verschiedenen Versuchen meist zum gleichen Zeitpunkt ausgelegt, wobei diese Vorgehensweise für die tatsächliche Anwendung der Werkstoffe nur wenig Praxisrelevanz hat. Deshalb wurden die Auslegungszeitpunkte der Proben am Standort Kuchl auf 3 unterschiedliche Monate (April, Juni und Oktober) definiert.

Die Abbildung 4.57 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Auslegungszeitpunkte an Douglasienproben. Die starke Verminderung der L^* -Werte am Anfang der Prüfung ist bei allen drei Versuchen

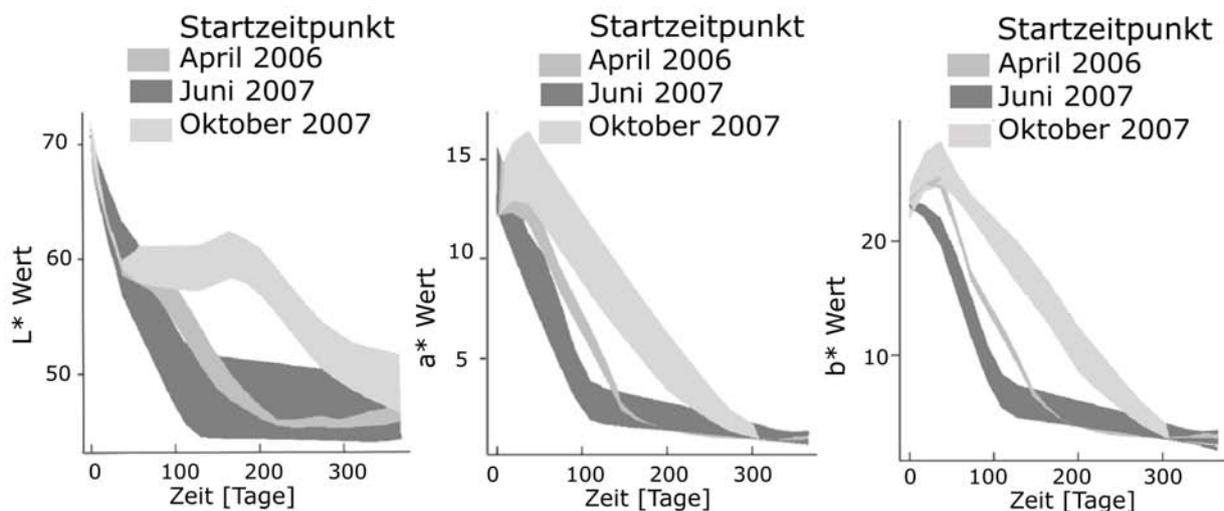


Abbildung 4.57: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Douglasieproben

identisch. Jedoch weist der Änderungsverlauf der im Oktober ausgelegten Proben einen Knick auf. Erst nach 200 Tagen ist ein Abwärtstrend erkennbar. Dieses Verhalten legen die a^* - und b^* -Werte nicht an den Tag. Jedoch zeigte sich, dass mit Abnahme der Bestrahlungsstärke die a^* - und b^* -Werte zunehmen (Abschnitt 4.4.4). Die Farbe gewinnt an Sättigung, an Rot- und an Gelb-Anteilen. Zwischen den Konfidenzbändern können Unterschiede festgestellt werden. Dennoch überschneiden sich die Bänder nach einjähriger Bewitterung, die Farbwerte (L^* , a^* , b^*) sind vergleichbar. Die schnellste Vergrauung wurde bei dem Auslegungszeitpunkt Juni 2007 beobachtet.

Der L^* -Wert der Eichenproben variiert bei den unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten (Abbildung 4.58). Die im Oktober ausgelegten Proben haben zu Beginn einen annähernd konstanten Wert. Im Anschluss fallen die Helligkeitswerte rapide ab und erreichen bis zum Versuchsende kein Plateau. Die a^* - und b^* -Werte haben einen vergleichbaren Verlauf und sind nach der Prüfdauer

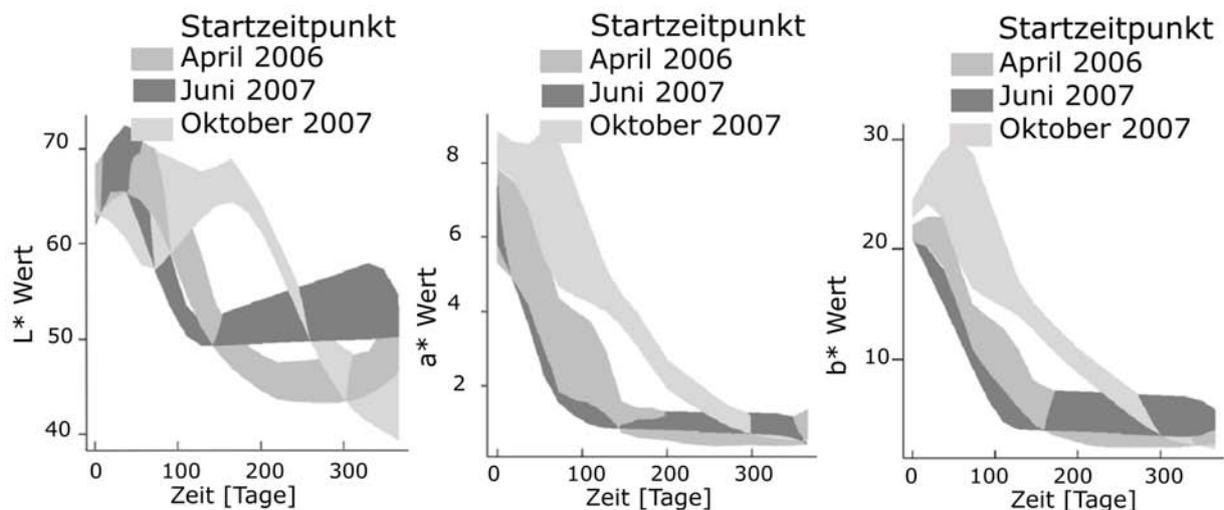


Abbildung 4.58: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Eichenproben

nicht signifikant unterschiedlich, wie die Überlappung der Konfidenzintervalle zeigt. Einzige Ausnahme ist der b*-Wert der im Oktober ausgelegten Proben, dieser weist eine deutliche Steigerung (Vergilbung der Proben) auf.

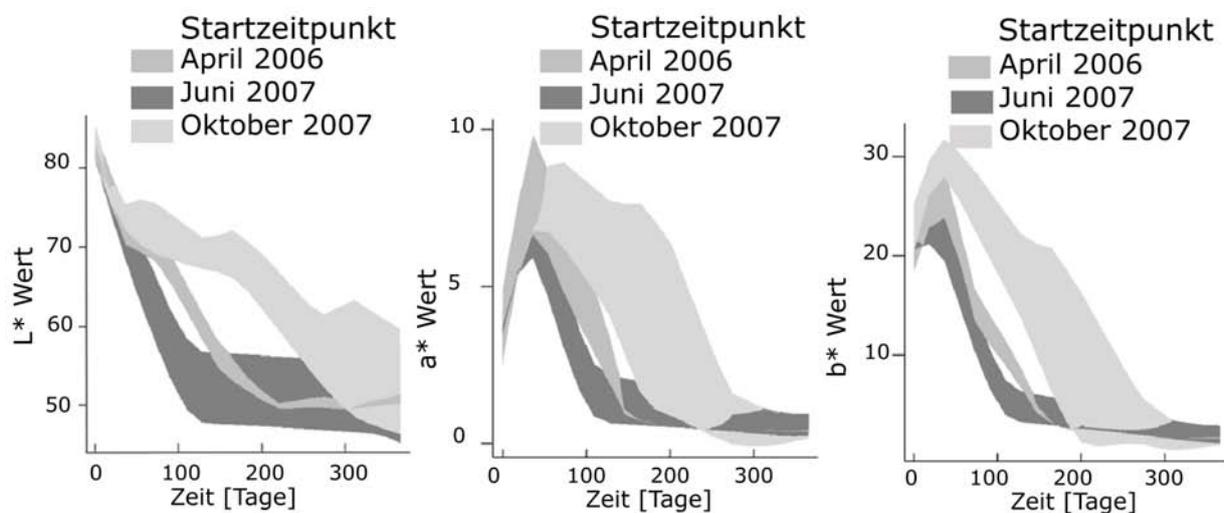


Abbildung 4.59: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Fichtenproben

Bei allen Farbparametern kann eine Überschneidung der Konfidenzintervalle der Fichtenproben über mehrere Monate beobachtet werden (Abbildung 4.59). Die anfänglich feststellbaren Differenzen beeinträchtigen die Unterschiede der Farbe nach Abschluss der Freibewitterung nicht. Die große Breite der Konfidenzbänder (hohe Streuung) bei den Proben vom Auslegungszeitpunkt Oktober

2007 sind auf die unregelmäßige Verfärbungen der Oberfläche durch Pilze und andere Ablagerungen zurückzuführen (Abbildung 4.60). Solche starken Ablagerungen hervorgerufen durch Pilze



Abbildung 4.60: Aufnahme der unregelmäßigen Verfärbungen an Fichtenoberflächen nach 6-monatiger Bewitterungszeit

und Fremdkörper (z. B. Russ) wurden nur bei den Fichten- und Tannenproben, die im Oktober ausgelegt wurden, festgestellt. Die kühl feuchten Umweltbedingungen sind für das Pilzwachstum geeignet (Schmidt 2006). Des Weiteren setzt im Spätherbst die Heizsaison ein, insofern kann es durch unsaubere Verbrennungsreaktionen zu vermehrter Russbildung kommen, die sich an Holzoberflächen im Außenbereich anlagern kann.

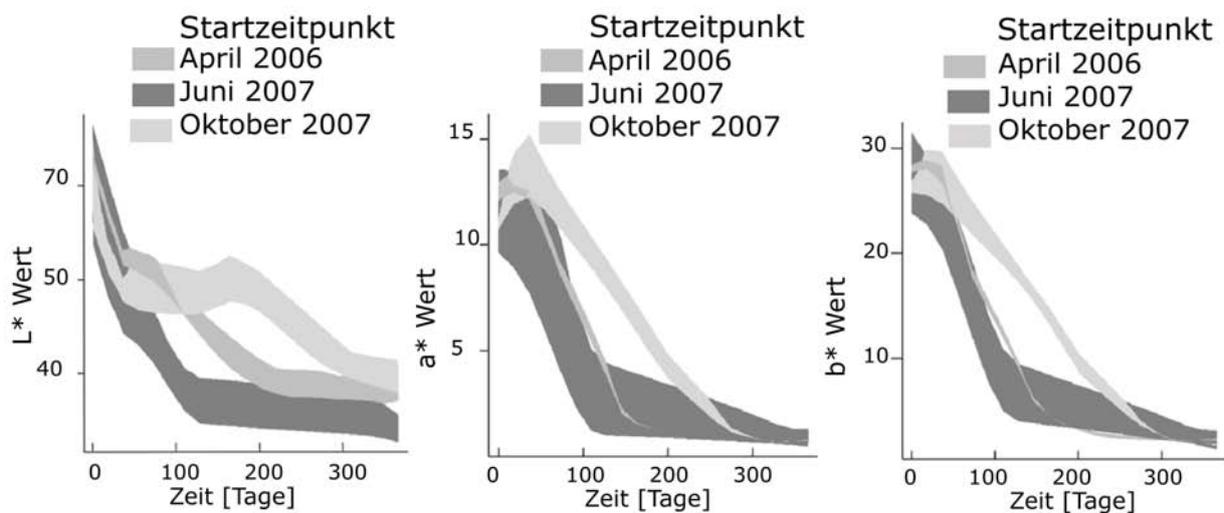


Abbildung 4.61: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Lärchenproben

Abbildung 4.61 zeigt die farblichen Veränderungen an Lärchenproben. Ein schnelles Vergrauen der Oberfläche erfolgte bei der Auslegung im Juni 2007. Dabei konnte die anfängliche Steigerung der a^* - und b^* -Werte bei diesem Auslegungszeitpunkt nicht festgestellt werden. Die hohe Bestrahlungsenergie und der Zenitstand der Sonne in den Sommermonaten beschleunigen den Vergrauungsprozess. Die a^* - und b^* -Werte am Ende der Bewitterungszeit sind gleich. Bei den Helligkeitswerten wurden Unterschiede festgestellt, hierbei sind der Auslegungszeitpunkt Juni 2007 und Oktober 2007 vergleichbar.

Durch die schmalen Konfidenzbänder bei den Tannenproben sind die Differenzen besonders gut wahrnehmbar (Abbildung 4.62). Der Verlauf der Farbverschiebungen ist bei allen Farbparametern

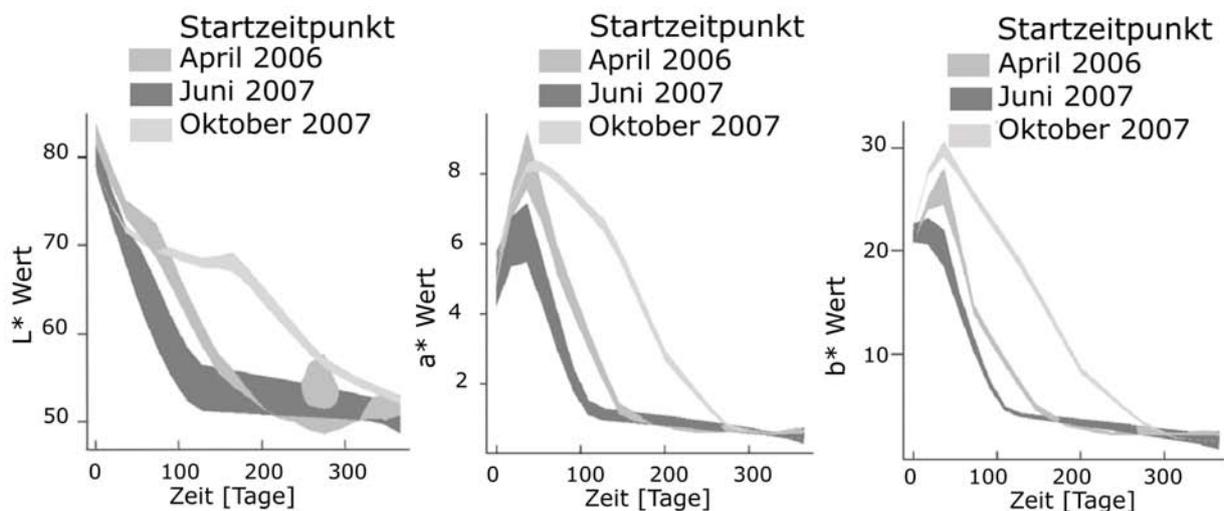


Abbildung 4.62: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Tannenproben

und Auslegungszeitpunkten ähnlich. Beim Prüfbeginn im Juni 2007 war das Vergrauen der Oberfläche am schnellsten erfolgt. Jedoch konnten am Ende der Freibewitterungsdauer keine signifikanten Unterschiede der einzelnen Farbwerte festgestellt werden. Die große Streuung der Helligkeitswerte bei den Proben mit Auslegungszeitpunkt April 2006 ist auf die hohe Holzfeuchtigkeit zurückzuführen.

4.5.5.2 Einfluss der unterschiedlichen Probenausrichtungen auf die Farbveränderung

Eine Analyse der Farbverschiebungen bei unterschiedlicher Probenausrichtung (Abschnitt 3.2.2) brachte keine signifikanten Unterschiede, wie beispielsweise die Darstellung für Fichtenproben

zeigt (Abbildung 4.63). Folglich sind Farbveränderungen von horizontaler und vertikaler Fassa-

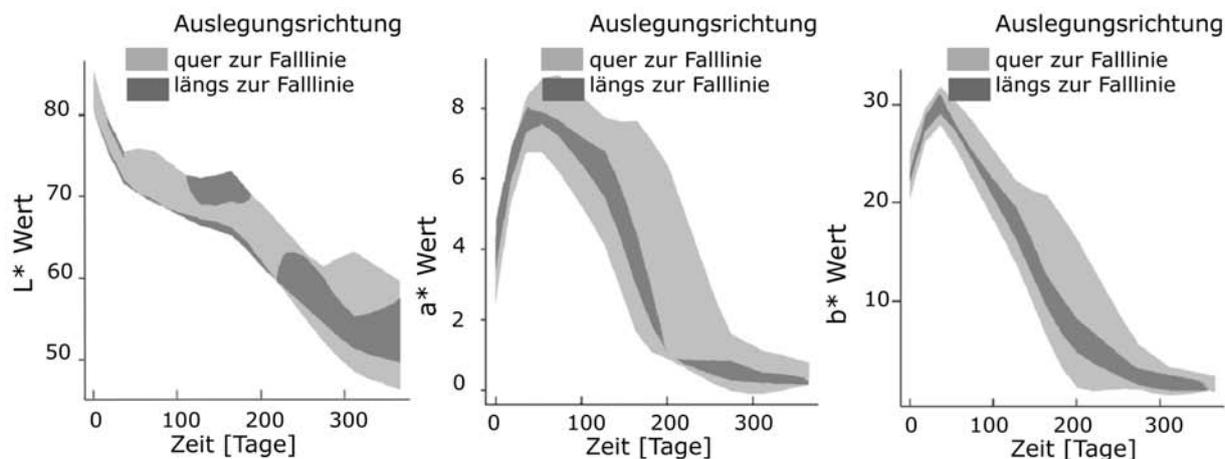


Abbildung 4.63: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Tannenproben

denschalungen vergleichbar, jedoch können die Auslegungswinkel zwischen den Freibewitterungsversuchen (45°) und einer Fassadenverschalung (90°) unterschiedlich sein. Dazu gibt Vogl (1999) eine Faustformel über die zweifache Beschleunigung der Veränderungen der Materialeigenschaften zwischen einer Probenauslegung mit einem Winkel von 45° und 90° . Ähnliche Ergebnisse über den höheren Ligninabbau bei einem Auslegungswinkel von 45° veröffentlichte Evans (1989).

4.5.5.3 Untersuchung des Farbverlaufes an zwei unterschiedlichen Standorten

Ein Vergleich der Verfärbungen am Standort Kuchl (1) und am Standort Berchtesgaden (2) bei dem Auslegungszeitpunkt Juni 2007 brachte im Gegensatz zum ersten Freibewitterungsversuch differenzierte Ergebnisse (Tabelle 4.7). Bei der Betrachtung der Konfidenzbänder waren die Veränderungen bei allen Holzarten fast identisch und am Ende der Bewitterung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, wie beispielsweise die Darstellung der Veränderungen bei den Fichtenproben zeigt (Abbildung 4.64). Creemers et al. (2002) stuften die Übertragung der Resultate von Bewitterungsprüfungen von einem Standort auf einen anderen als nicht möglich ein. Dabei waren zwischen den untersuchten Standorten große Entfernungen. Die geringe Entfernung zwischen Kuchl und Berchtesgaden könnte die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zum Teil erklären. Jedenfalls beschleunigen die Klimabedingungen im Sommer den Vergrauungsprozess an der Holzoberfläche. Für eine Verifizierung dieses Verhaltens wären mehrmalige Auslegungen in den Sommermonaten

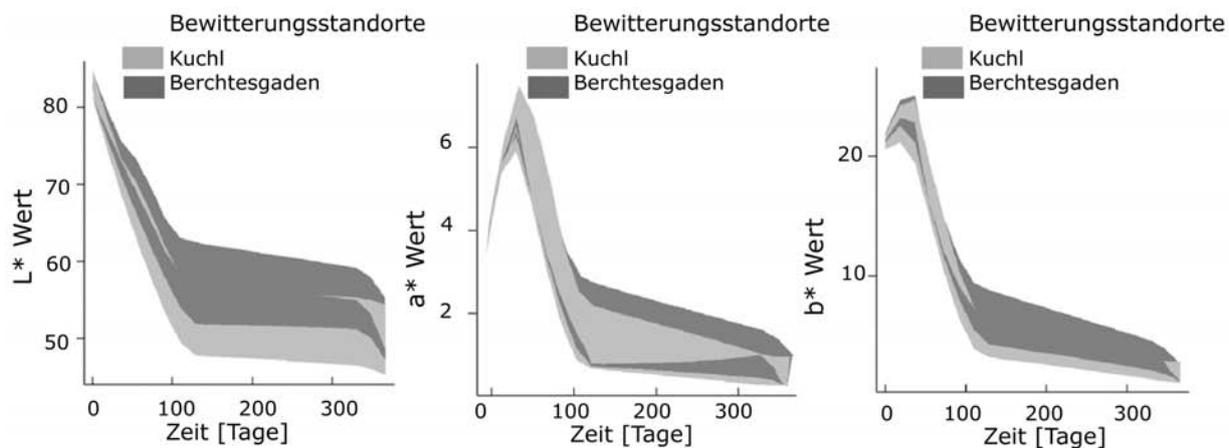


Abbildung 4.64: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Fichtenproben

an beiden Standorten nötig, jedoch war dies auf Grund der zeitlichen Begrenzung des Projektes nicht möglich.

4.5.6 Umweltsimulation der natürlichen Veränderungen im Labor

Im vorigen Abschnitt wurden die Veränderungen der Holzoberflächen im Außenbereich dargestellt. In diesem Absatz werden die Auswirkungen der künstlichen Bewitterungen oder Umweltsimulationen im Labor auf die Holzoberflächen behandelt. Dabei zeigte sich, dass nicht alle festgestellten Einflüsse, wie Insektenfraß, Faserabtrag, Verschmutzung und Pilzbefall im Labor simuliert werden konnte.

Bei unterschiedlichen Einflüssen konnten die Auswirkungen auf die Holzoberflächen einzeln untersucht werden. Die chemische Veränderungen bei den unterschiedlichen Einflüssen wurden bereits in den Abschnitten 4.4.4 und 4.5.5 diskutiert.

4.5.6.1 Einfluss der UV-Bestrahlung in Verbindung mit Wasser

Die Versuchsparameter der Umweltsimulationen sind in der Tabelle 3.4 definiert.

Der Verlauf der Farbänderungen an Eichenproben durch die einzelnen Versuchsvarianten ist in der Abbildung 4.65 dargestellt. Die große Streuung der Konfidenzbänder der L*- und a*-Werte bei der Versuchsreihe (5) ist auf die unterschiedliche Ausrichtung der Jahrringlage der Proben zurückzuführen.

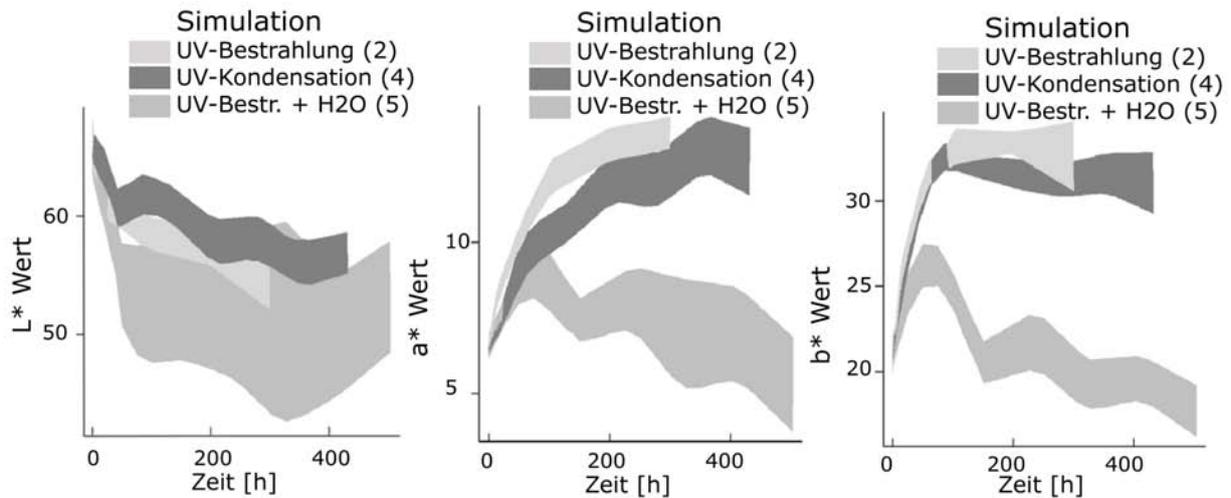


Abbildung 4.65: Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Eichenoberflächen

ren. Mit steigendem Wassereinsatz bei der Umweltsimulation werden die Veränderung der a^{*}- und b^{*}-Werte stärker beeinflusst. Bei Verwendung der Wassersprühung werden die Werte deutlich reduziert. Die klaren Veränderungen nach 192 und 360 Simulationsstunden treten nach den Kondensationsphasen auf. Besonders bei den Eichenproben werden die Abbauprodukte ausgeschwemmt. Eine Beeinflussung der Holzfeuchte auf die Farbmessung konnte ausgeschlossen werden, da die Holzfeuchte bei den Messungen zwischen 7 - 12% lag.

Abbildung 4.66 zeigt das Verhalten der Farbe an Douglasien- und Lärchenproben während unterschiedlicher Einflüsse. Bei den Änderungsraten der Helligkeitswerte (L^{*}) sind geringfügige Unterschiede feststellbar. Deshalb ist der Einfluss des Wassers auf die L^{*}-Werte bei der Simulation gering. Bei a^{*}- und b^{*}-Werten sind deutliche Differenzen wahrnehmbar. Die Steigerungsrate während der ersten 100 Stunden UV-Bestrahlung ist bei allen Simulationen ähnlich. Danach steigen die Werte beider Farbparameter der Douglasienproben bei der Simulation 2 weiter an. Bei der Versuchsreihe mit UV-Bestrahlung und Kondensationszyklen steigen nur die a^{*}-Werte nach den ersten 100 Stunden an. Nach 360 Stunden wurde eine starke Verminderung festgestellt. Die b^{*}-Werte verringerten sich nach 100 Stunden Simulation. Bei der Versuchsreihe 5 wurden nach der anfänglichen Steigerung der a^{*}- und b^{*}-Werte eine deutliche Reduzierung dieser Werte festgestellt. Die Abbauprodukte der Douglasienproben werden durch die Wassersprühung ausgewaschen.

Bei den Lärchenproben wurden nur geringfügige Unterschiede zwischen den Varianten (2) und (4) bei den L^{*}-Werten festgestellt (Abbildung 4.66). Durch den Kondensationsprozess wurden die farblichen Bestandteile an der Lärchenoberfläche nicht ausgewaschen, da nur eine Steigerung der

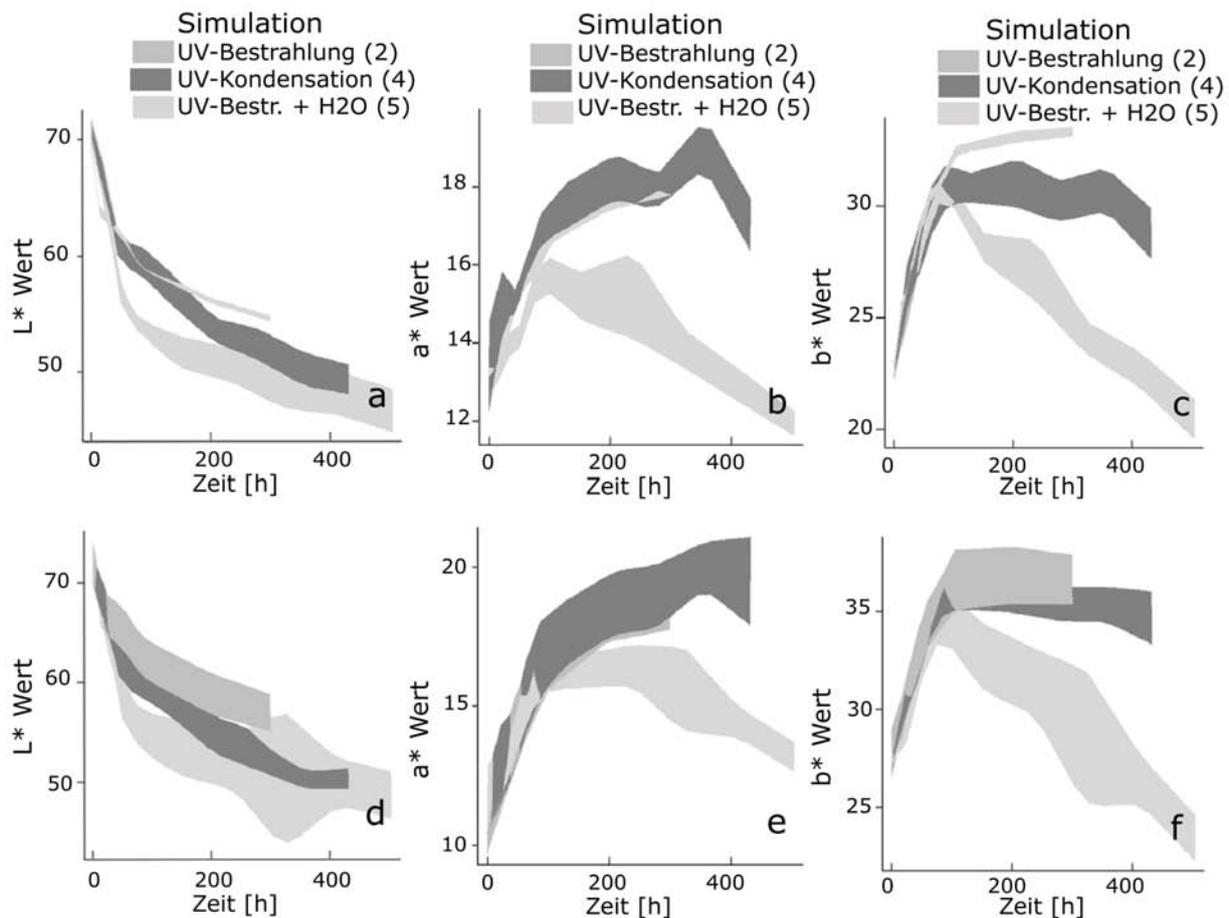


Abbildung 4.66: Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L*-, a*- und b*-Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Douglasie, d-f: Lärche

Holzfeuchte festzustellen war, jedoch keine Betauung (Wasserperlen) der Holzoberfläche. Nach einer 100 stündigen Simulation mit UV-Bestrahlung und Wasserbesprühung setzte eine Reduktion der a*- und b*-Werte ein. Bei dieser Umweltsimulation wurden die farblichen Abbauprodukte ausgewaschen.

Bei den Fichten- und Tannenproben wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen der Simulationsvariante (2) und (4) festgestellt (Abbildung 4.67). Folglich sind die Auswirkungen auf die Farbveränderung mit und ohne Kondensationsphase (Betauung) ähnlich. Die a*-Werte (Rot-Anteil) steigen bis zum Ende der Prüfung an. Nach 100 Stunden erfolgte ein Konvergieren der b*-Werte zu einem Maximalwert. Bei der Simulation mit Wassersprühung fallen die a*- und b*-Werte ab. Die Farbsättigung nimmt bei den b*-Werten besonders ab.

Der Verlauf der Helligkeit an Tannenoberflächen ist bei allen drei Versuchsreihen vergleichbar. Das Tannenholz wird durch die Simulationen dunkler. Bei den Werten der Sättigung und Farbtöne wur-

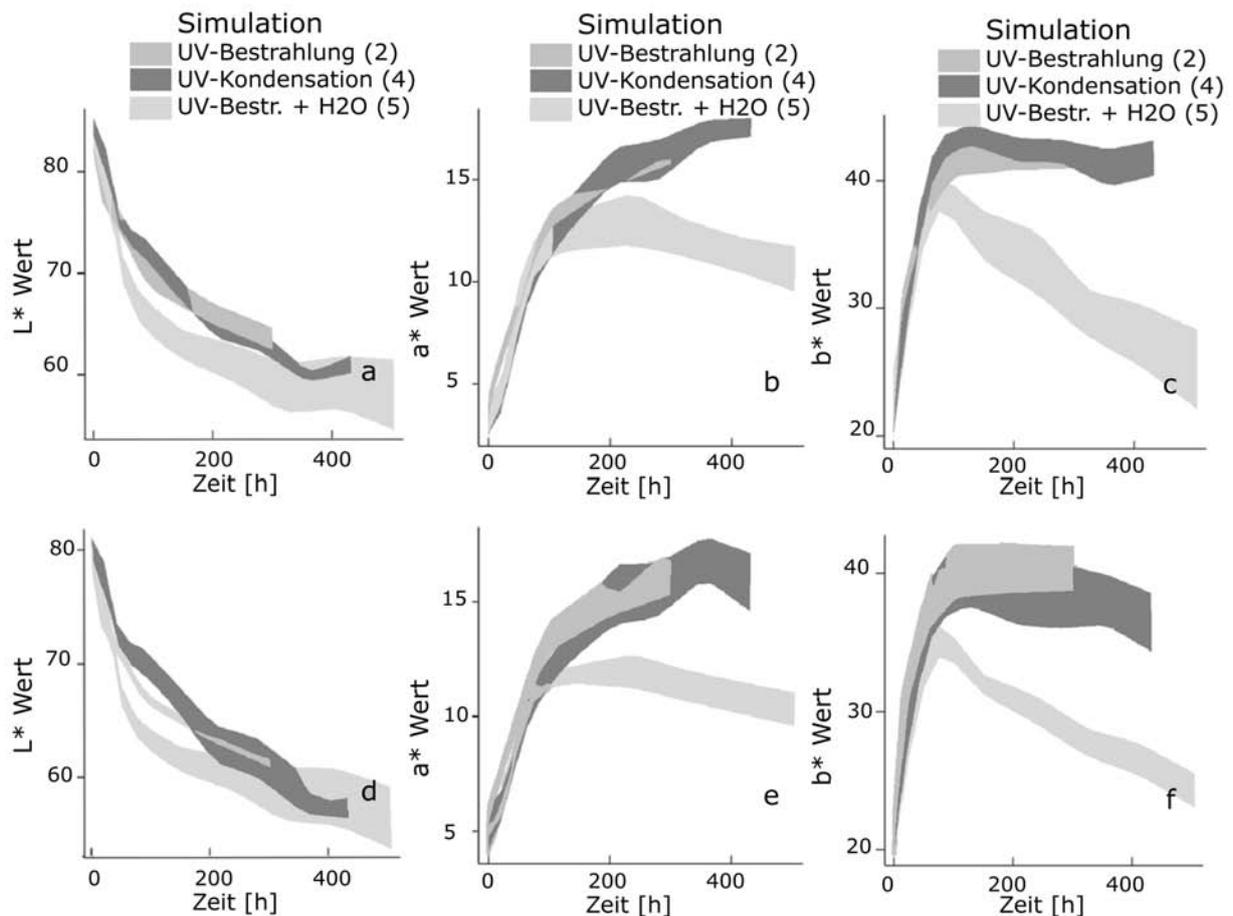


Abbildung 4.67: Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Fichte, d-f: Tanne

de ein Einfluss der Varianten aufgezeigt. Die Varianten (2) und (4) weisen keine signifikanten Unterschiede bei den Veränderungen im Rot- und Gelb-Bereich auf. Durch den Einsatz der Wassersprühung konnten Zunahmen und Abnahmen der a^{*}- und b^{*}-Werte festgestellt werden. Die anfängliche Steigerung der a^{*}- und b^{*}-Werte verringerte sich nach 100 Stunden Simulationsdauer. Der Sättigung des Rot-Bereiches nahm geringfügig ab. Bei den b^{*}-Werten wurden deutliche Reduktionen gemessen.

4.5.6.2 Einfluss der Wasserbesprühungszeit und Bestrahlungsstärke

Der Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Farbwerte wurde im Abschnitt 4.4.4 behandelt. Diese Resultate zeigen einen geringen Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Farbveränderungen bei

unterschiedlichen Holzarten. Dagegen wurden die Helligkeitswerte der Eichenproben durch die län-

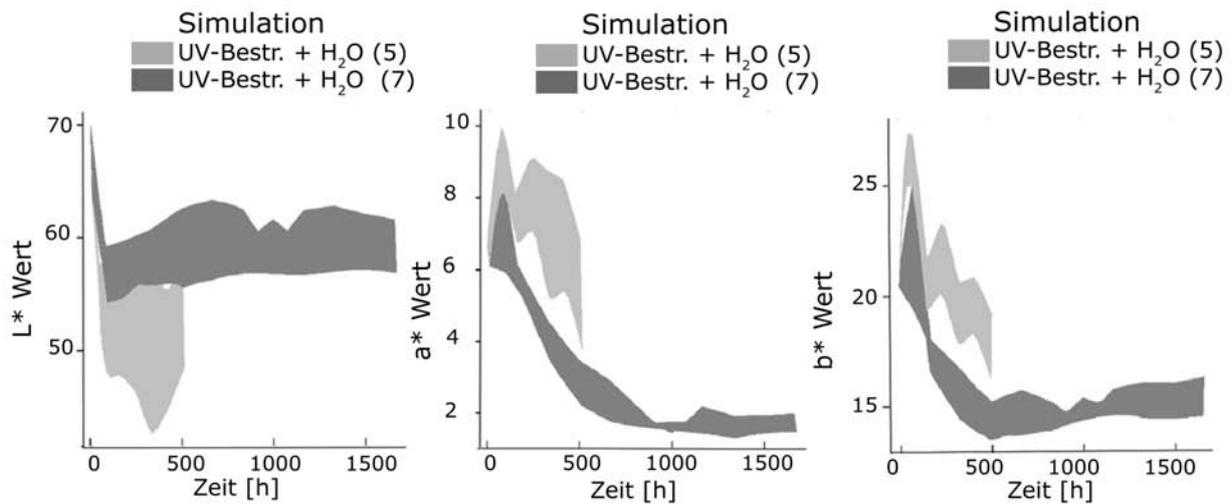


Abbildung 4.68: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Eichenoberflächen

geren Wasserbesprühzeiten stärker beeinflusst und verringerten sich deutlich gegenüber der Simulationsvariante (7) (Abbildung 4.68). Stabile L^{*}-Werte wurden nach 500 Stunden Simulationsdauer



Abbildung 4.69: Visuelle Betrachtung der bewitterten Eichenoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer

bei der Variante (7) festgestellt. Die Zerstörung und Auswaschung der farblichen Holzbestandteile erfolgte bei kürzeren Simulationszyklen vermehrt.

Abbildung 4.69 zeigt die visuelle Wahrnehmung der bewitterten Eichenoberflächen. Im Anschluss an die Bewitterungsflächen sind deutliche Ablagerungen der Abbauprodukte und Inhaltsstoffe (dun-

kelbraune Bereiche) erkennbar. Abbildung 4.70 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Wasserbesprühzeiten und der geringeren Bestrahlungsstärke (vgl. Tabelle 3.4). Der Änderungsverlauf beider

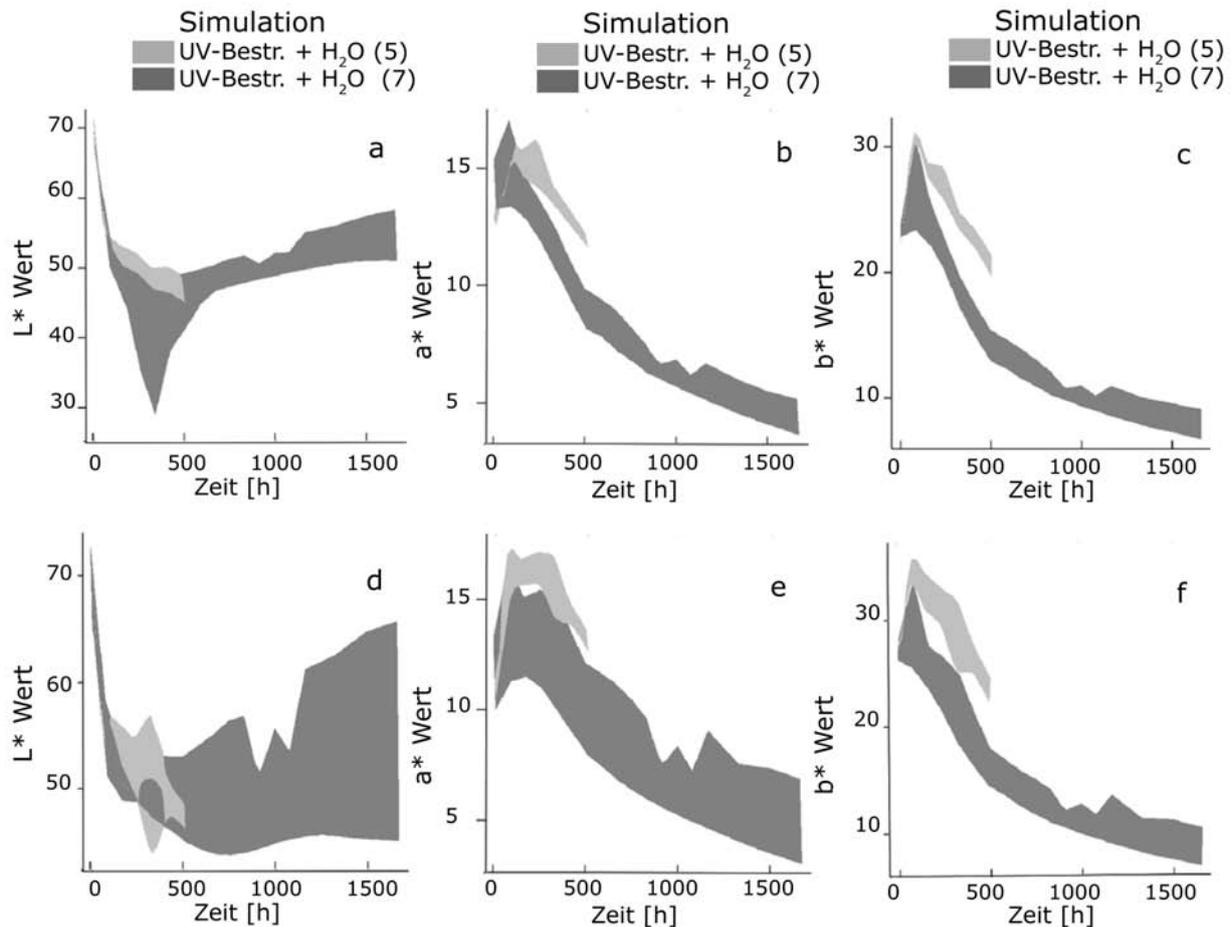


Abbildung 4.70: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L*-, a*- und b*-Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Douglasie, d-f: Lärche

Simulationen ist identisch. Der unregelmäßige farbliche Eindruck der Lärchenproben wurde für die hohe Streuung der L*- und a*-Werte verantwortlich gemacht.

Durch die Umweltsimulation kam es zu keinem einheitlichen Verwitterungsprozess bei den Proben. Zum einen sind die Wasserdüsen in größeren Abständen (17 cm) im Simulationsgerät angeordnet, folglich können kurzfristig Unterschiede bei der Besprühung der Proben entstehen, da bei größerer Entfernung zur Düse sich die Beaufschlagungsmenge und der Druck des Sprühwassers verändern. Zum anderen waren die Frühholzbereiche einheitlich vergraut, wogegen Spätholzbereiche noch einen braunen Farbton aufwiesen (Abbildung 4.71). Die Douglasienproben zeigten keine ho-

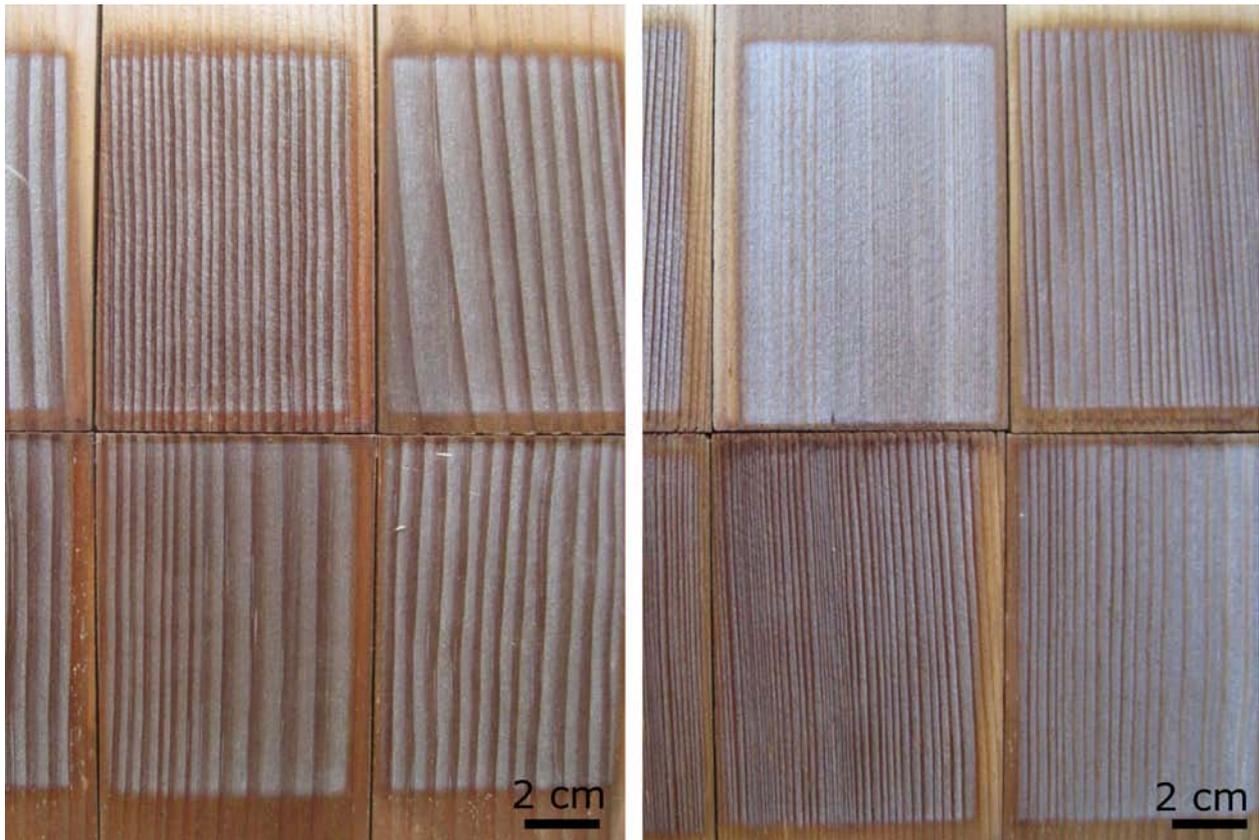


Abbildung 4.71: Visuelle Betrachtung der bewitterten Holzoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer, links: Douglasie, rechts: Lärche

mogene Verwitterungserscheinungen auf, jedoch war die Farbverschiebung von Früh- zu Spätholz einheitlicher. Da bei dem eingesetzten Farbmessgerät der Mittelwert über die Messfläche errechnet wird, weist daher die Douglasienoberfläche weniger Streuung auf.

Die L^* -Werte der Fichten- und Tannenoberflächen sind bei beiden Simulationsvarianten vergleichbar und nahmen durch den Einfluss der UV-Strahlung und Wasserbesprühung ab (Abbildung 4.72).

Die Verkürzung des Zeitintervalls der Wasserbesprühung führte bei den Helligkeitswerten in keine Veränderung gegenüber dem längeren Wassersprühzyklus. Die vermehrten Zykluswechsel (Ver-

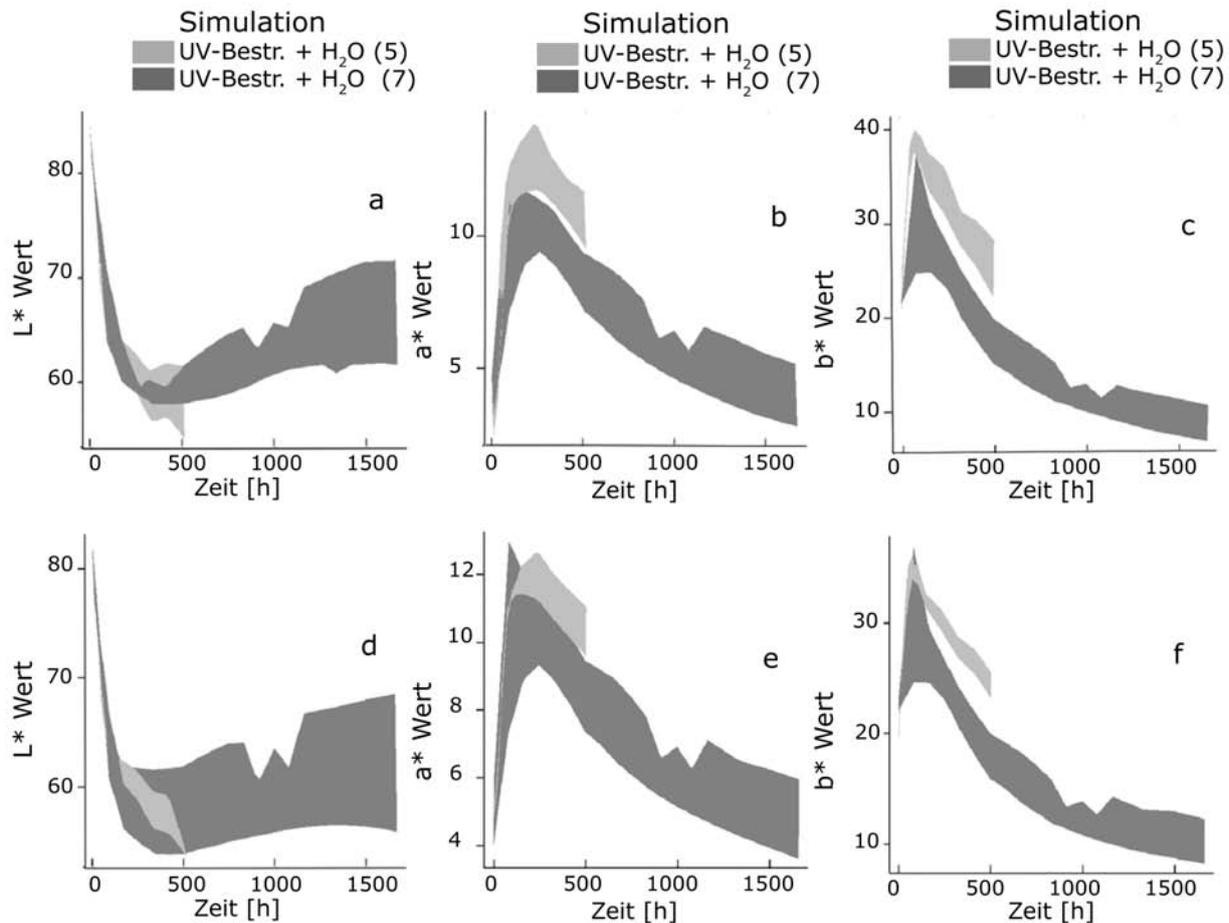


Abbildung 4.72: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Fichte, d-f: Tanne

suchsreihe 7, siehe Abschnitt 3.2.3) und die niedrige Bestrahlungsstärke lassen die Holzoberflächen schneller vergrauen. Dabei spielt die Farbveränderung durch den Unterschied der Bestrahlungsstärke eine weit geringere Rolle (Abbildung 4.37).

Bei der visuellen Betrachtung der Holzoberfläche von Fichte und Tanne zeigten sich Ähnlichkeiten (Abbildung 4.73). Einige Proben weisen eine hellgraue Verfärbung der Oberfläche auf, hauptsächlich im Frühholzbereich der Jahrringe. Die Spätholzanteile der Jahrringe erscheinen als rotbräunlich.

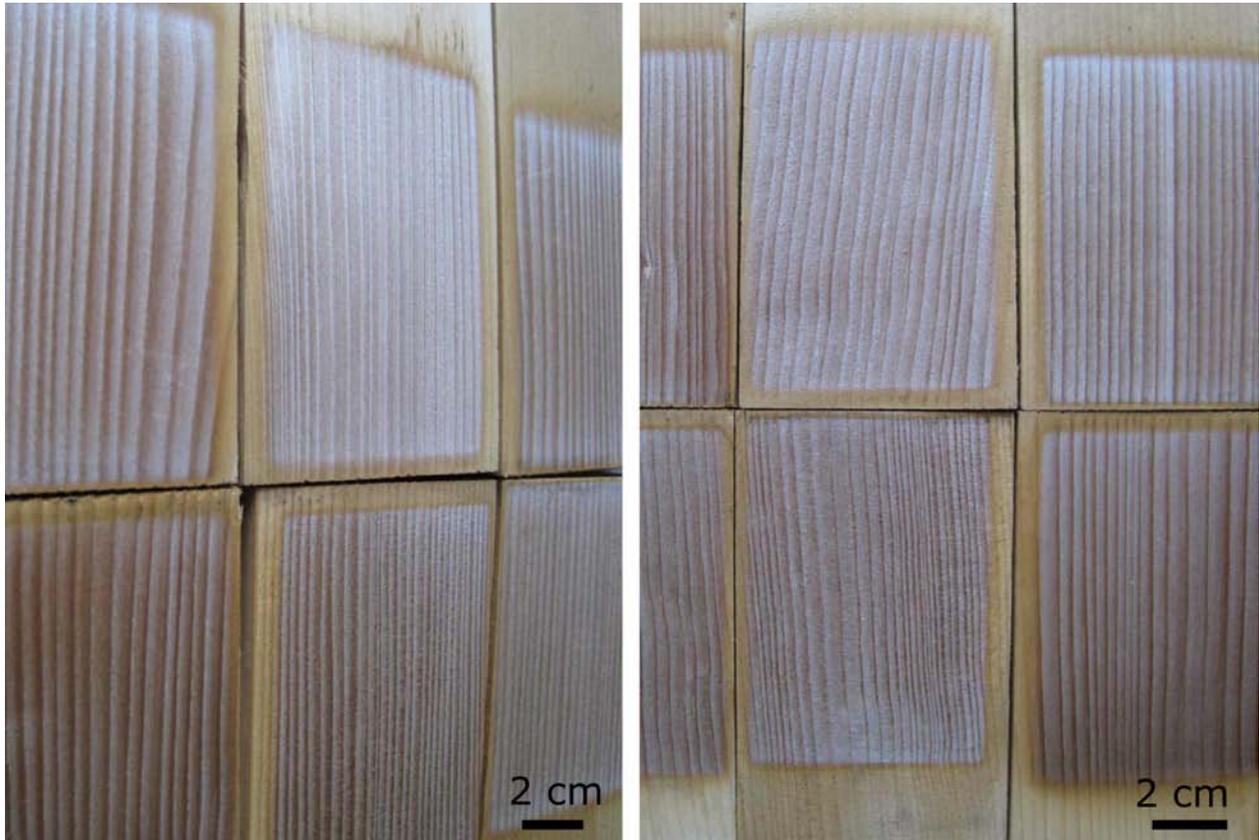


Abbildung 4.73: Visuelle Betrachtung der bewitterten Holzoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer , links: Fichte, rechts: Tanne

4.5.6.3 Einfluss des pH-Wertes bei der Umweltsimulation

Bei der Analyse der farblichen Veränderungen durch die Verringerung des pH-Wertes zeigte sich, dass bei den Eichenproben keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten (Abbildung 4.74). Die hohe Breite der Konfidenzbänder wird auf die unterschiedliche Jahrringlage zurückgeführt. Ein weiterer Grund ist die Beeinflussung durch andere Eichenproben. Die Proben in der Prüfkammer sind zweireihig übereinander angeordnet, dadurch wurden ausgewaschene Inhaltsstoffe von der oberen Probe auf die untere Probe transportiert. Dieses Verhalten wurde nur bei

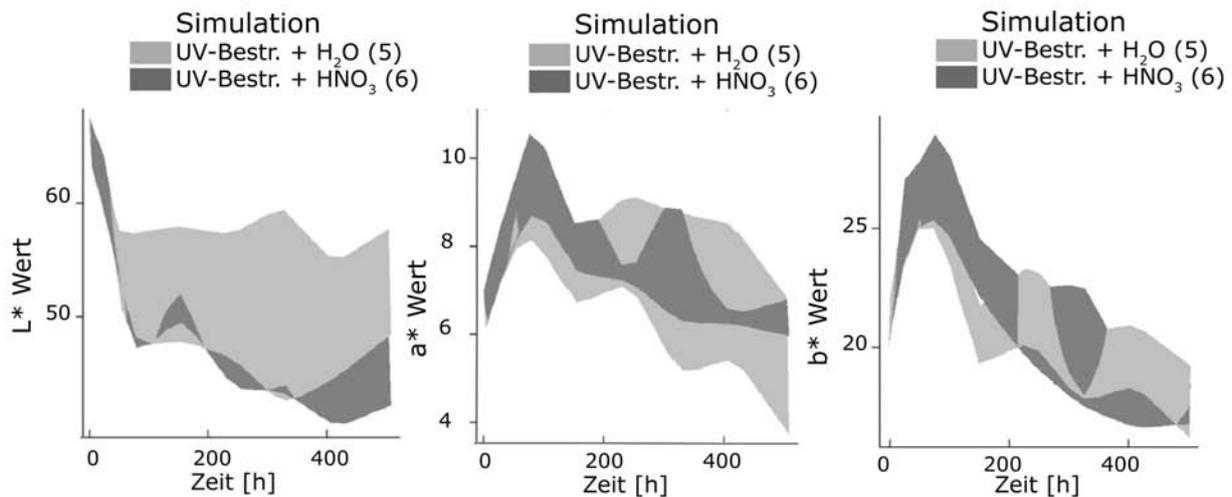


Abbildung 4.74: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsart auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Eichenoberflächen

den Eichenproben beobachtet.

Bei allen anderen Holzarten sind die Auswirkungen der Veränderung des pH-Wertes vergleichbar, beispielsweise zeigt Abbildung 4.75 die Auswirkungen von HNO₃ an Fichtenoberflächen. Die Hel-

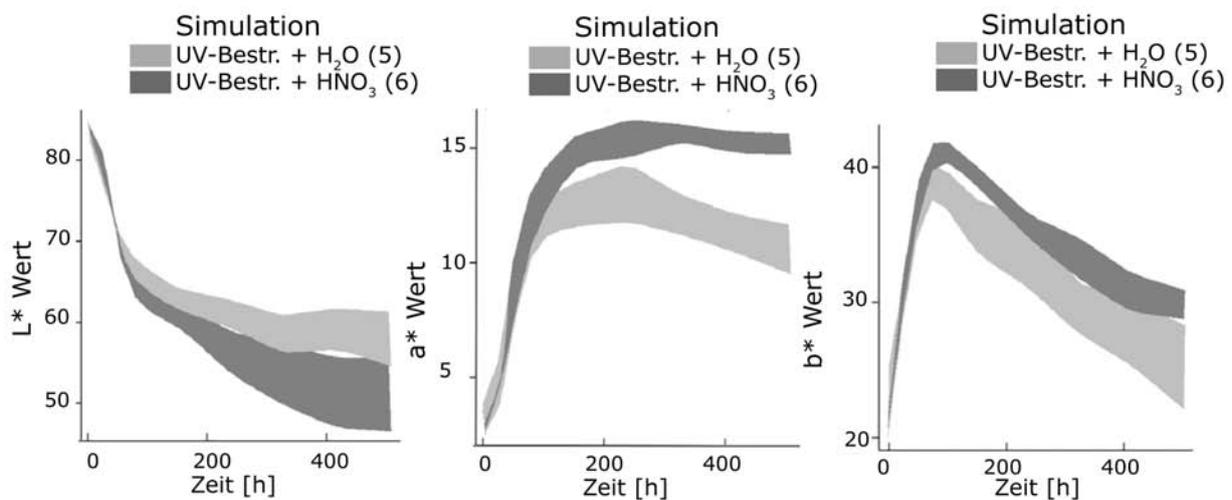


Abbildung 4.75: Einfluss der unterschiedlichen Simulationsart auf die L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Farbwerte an Fichtenoberflächen

ligkeitswerte sind durch den Einsatz der Salpetersäure signifikant niedriger. Die Holzoberfläche erscheint dunkler gegenüber der Probenoberfläche bei der Simulationsvariante (5). Die a^{*}- und b^{*}-Werte verringerten sich bei der Simulation (5) stärker als bei der Variante (6). Durch den Einfluss der Salpetersäure und UV-Bestrahlung erscheinen die Oberflächen der Douglasie, Fichte, Lärche und Tanne dunkler. Die Farbsättigung wurde verringert, die Holzfarbe verblasst, jedoch in einem

geringeren Ausmaß als bei der Simulationsvariante (5).

4.5.6.4 Vergleich der Auswirkungen einer Freibewitterung mit einer Umweltsimulation

Simms (1987) entwickelte dazu eine Methode für die Vergleichbarkeit von Auswirkungen der Freibewitterung mit Umweltsimulationen. Dabei werden die Materialveränderungen durch die beiden Bewitterungsarten berücksichtigt. Infolgedessen wird der „Acceleration shift factor“ (ASF) bestimmt, der den Beschleunigungsfaktor zwischen den künstlichen und natürlichen Bewitterungsversuchen angibt. Die ASF-Werte ergeben sich aus der Division der Stunden einer natürlichen Bewitterungsdauer durch die Anzahl der Stunden einer Umweltsimulation im Labor Simms (1987). Die Bestimmung der benötigten Stunden erfolgt über einen Vergleich der Auswirkungen auf die Materialeigenschaften bei natürlicher und künstlicher Bewitterung.

Abbildung 4.76 zeigt schematisch einen grafischen Vergleich der Farbveränderungen bei natürli-

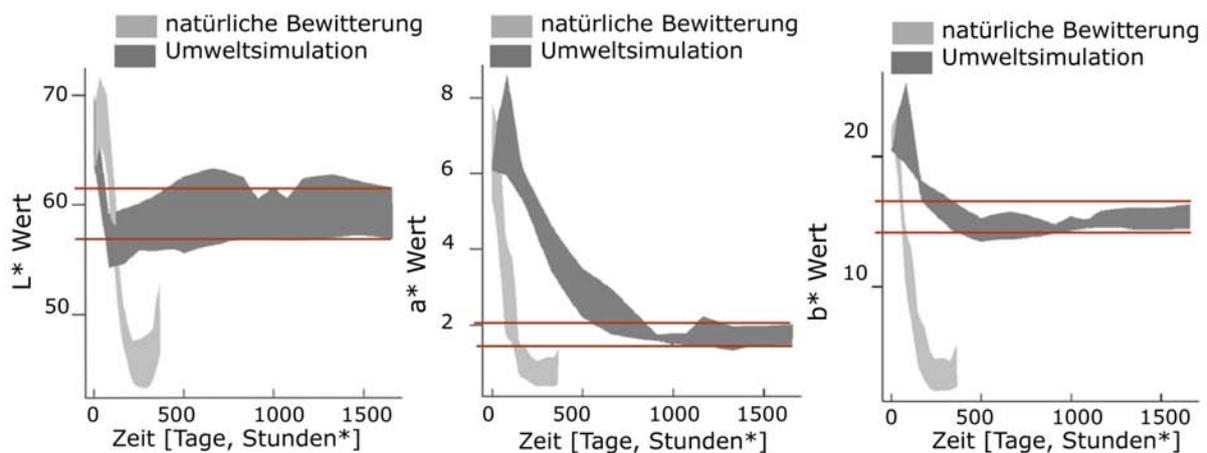


Abbildung 4.76: Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbwerte bei natürlichen und künstlich bewitterten Eichenproben, * Zeiteinheit der Umweltsimulation

cher und künstlicher Bewitterung, somit konnten die benötigten Angaben der unterschiedlichen Zeiten bestimmt werden und die ASF-Werte errechnet werden. Da es sich hierbei um die schematische Darstellung handelt, wurden auf der X-Achse zwei unterschiedliche Einheiten der Zeitmessung (Stunden und Tage) aufgetragen. Infolgedessen ist nur der Vergleich über die ASF-Werte zulässig. Die Veränderungen wurden über die Darstellung ermittelt und mit den Farbwerten der Proben aus der Freibewitterung (1 Jahr, Auslegungszeitpunkt April) und Simulation (7) (1661 Stunden) berechnet. Hieraus ergaben sich bei den Auswirkungen zeitliche Unterschiede, die durch den „Ac-

celeration shift factor“ ausgedrückt werden. Die einzelnen ASF-Werte der jeweiligen Holzart sind aus der Tabelle 4.8 ersichtlich.

Dabei sind die Werte von den Holzarten Douglasie und Lärche vergleichbar, ebenso wie die errechneten ASF-Werte bei Fichte und Tanne übereinstimmen.

Tabelle 4.8: Errechnete ASF Werte zwischen natürlicher und künstlicher Bewitterung

Grenzen der 99% Konfidenzintervalle	L*	a*	b*
Douglasie			
untere Grenze	5,29	1,59	1,73
obere Grenze	5,29	2,02	2,17
Eiche			
untere Grenze	1,59	1,01	1,01
obere Grenze	2,17	1,88	1,59
Fichte			
untere Grenze	1,73	1,16	1,30
obere Grenze	2,31	1,88	2,02
Lärche			
untere Grenze	5,29	1,59	1,73
obere Grenze	5,29	2,02	2,17
Tanne			
untere Grenze	1,73	1,15	1,30
obere Grenze	2,31	1,88	2,02

Die einzelnen Farbparameter besitzen einen unterschiedlichen Beschleunigungsfaktor der Umweltsimulation. Besonders der L*-Wert weist einen hohen ASF auf und kann durch die künstliche Bewitterung mit UV-Strahlung und Wasserbesprühung gut simuliert werden. Die Veränderungen der a*- und b*-Werte können durch die Simulation nicht so wirkungsvoll nachgestellt werden, sie weisen einen deutlich niedrigeren ASF auf.

Dieser Vergleich zeigt auch die Grenzen der Umweltsimulation auf, da zurzeit nicht alle Umwelteinflüsse im richtigen Maß simuliert werden können. Somit ergeben sich deutliche Intensitätsunterschiede bei einem Vergleich zwischen Freibewitterung und Umweltsimulation (Abbildung 4.76). Jedoch konnte eine tendenziell eine Annäherung zum zeitlichen Verlauf der Farbänderungen bei der Freibewitterung erreicht werden.

4.5.7 Umweltsimulation thermisch modifizierter Laubhölzer

Frühere Untersuchungen von Ayadi et al. (2003) zeigten eine deutliche Farbstabilität von thermisch modifizierten Hölzern (Buchen-, Eschen-, Pappel- und Kiefernholz bei 2-stündiger Temperaturbehandlung bei 240°C) bei der künstlichen Bewitterung. Dabei wurde ein Zyklus von 2,5 Stunden UV-Bestrahlung mit anschließender 30 minütiger Kondensationsphase verwendet. Diese Resultate

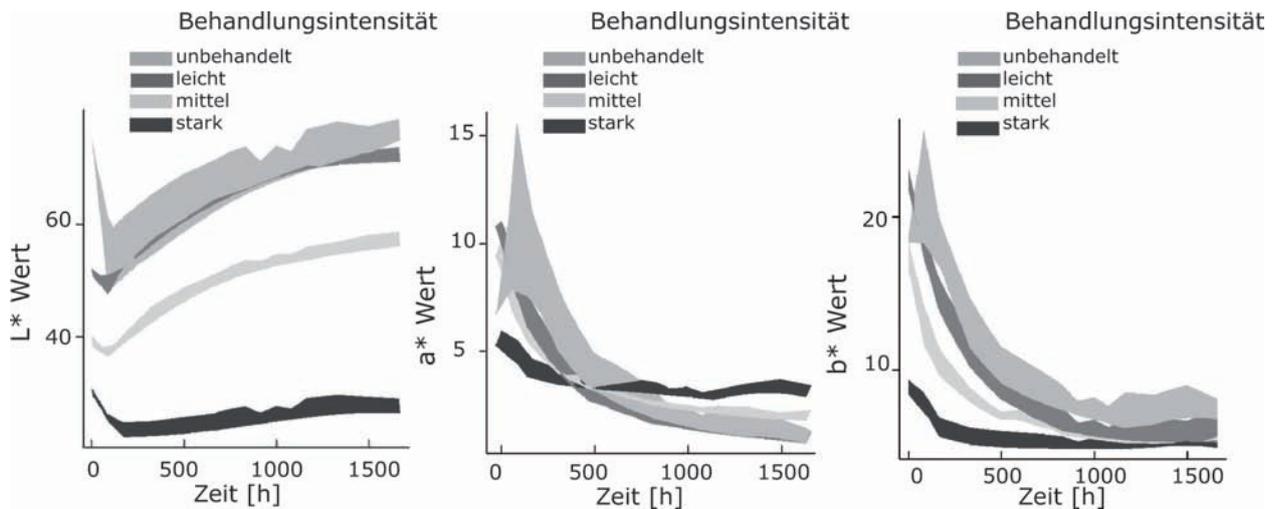


Abbildung 4.77: Einfluss der Umweltsimulation auf die farblichen Veränderungen an der Oberfläche bei thermisch modifizierter Buche

konnten durch die vorliegenden Ergebnisse an Buchen- und Eschenholz bestätigt werden (Abbildung 4.77 und 4.78). Mit zunehmender Behandlungsintensität wurden geringere Farbveränderun-

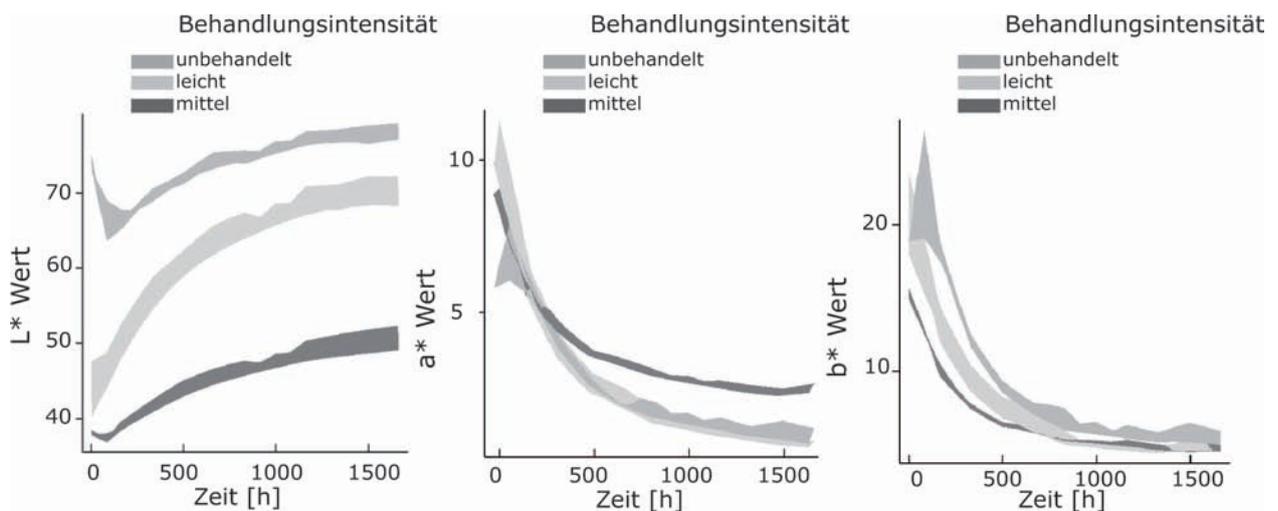


Abbildung 4.78: Einfluss der Umweltsimulation auf die farblichen Veränderung an der Oberfläche bei thermisch modifizierter Esche

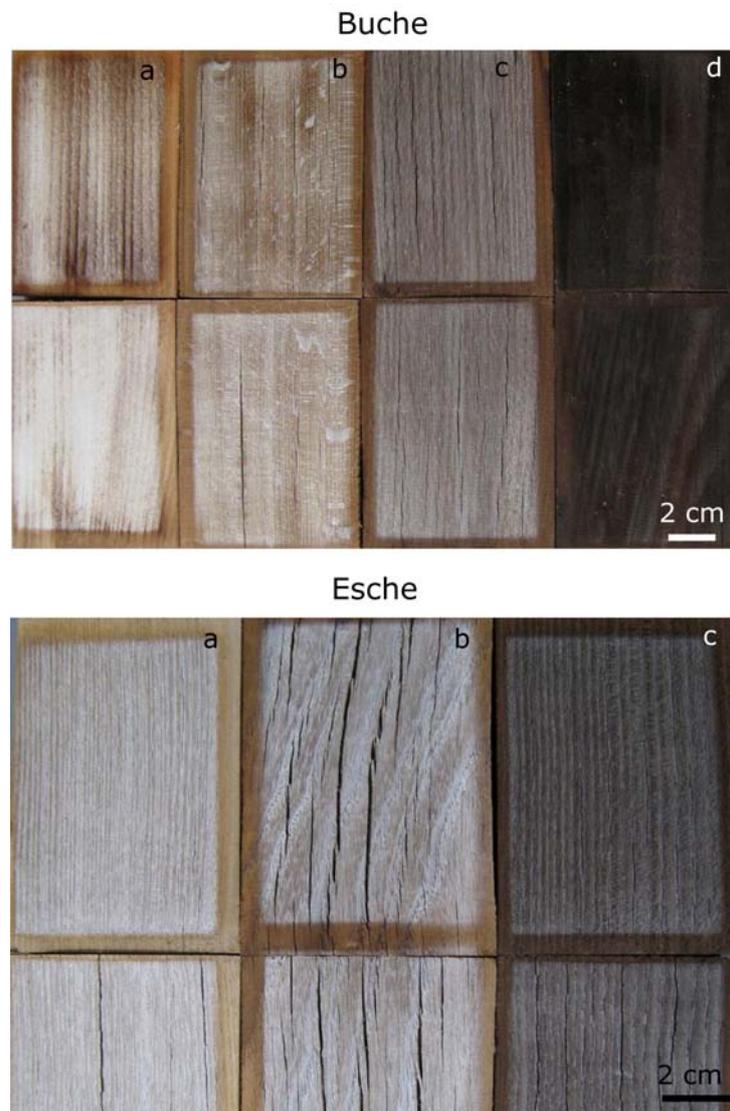


Abbildung 4.79: Visueller Eindruck der farblichen Veränderungen an thermisch modifizierten Buchen- und Eschenholz nach 1661 Stunden Simulationsdauer a: unbehandelt, b: leichte Behandlungsintensität, c: mittlere Behandlungsintensität, d: starke Behandlungsintensität

gen festgestellt. Abgesehen von dem differenzierten anfänglichem Verlauf der a^* - und b^* -Farbwerte an den unbehandelten Laubhölzern waren die Tendenzen der Konfidenzbänder vergleichbar. Während die L^* -Werte bei allen Behandlungsstufen stiegen, wurden bei den a^* - und b^* -Werten Abnahmen ermittelt.

Der visuelle Eindruck der bewitterten Holzoberfläche ist in Abbildung 4.79 dargestellt. Deutliche Unterschiede sind zwischen den Behandlungsstufen erkennbar.

Windeisen et al. (2007) analysierten die chemischen Veränderungen während der Produktion von

thermisch behandeltem Buchenholz und zeigten eine Zunahme der phenolischen OH-Gruppen mit steigender Behandlungstemperatur. Des Weiteren gehen Sivonen et al. (2002) und Nuopponen et al. (2004) von einer Erhöhung der Vernetzung innerhalb der Ligningruppen bei der thermischen Behandlung aus. Den höheren Gehalt phenolischer Gruppen in thermisch modifizierten Hölzern gaben Ayadi et al. (2003) als Grund für die verbesserte Farbstabilität an. Unter anderem könnte die bessere Vernetzung der Ligningruppen ebenfalls das Verhalten der thermisch modifizierten Laubhölzer während der Umweltsimulation erklären. Wahrscheinlich sind beide Unterschiede (höherer Phenolgehalt und bessere Vernetzung) für die Farbstabilität verantwortlich. Da Extraktstoffe (häufig phenolische Strukturen) im Holz antioxidative Eigenschaften aufweisen, erhöhen sie die Farbstabilität bei Lichtbestrahlung (Morgan und Orsler 1968).

4.5.8 Zusammenfassende Betrachtung der Auswirkungen der natürlichen Bewitterung im Außenbereich und deren Simulation im Labor

Bei Außenanwendungen mit vollem Einfluss der Klimabedingungen und der biotischen Faktoren wurden eine Vielzahl von Auswirkungen auf die untersuchten Holzoberflächen festgestellt. Neben der Bildung von Rissen werden auch farbliche Verfärbungen durch Holzabbau, Verschmutzungen und Pilzbefall wahrgenommen. Hierbei sind vor allem Fichte und Tanne, die von diesen Auswirkungen betroffen sind, zu nennen. Bei der makroskopischen Betrachtungsweise ist der Insektenfraß und die Abtragung der Faserbündel an den Oberflächen hervorzuheben. Beide beeinflussen das Erscheinungsbild von Holzoberflächen, jedoch ist der Insektenfraß nur punktuell festzustellen. Bei Eichenoberflächen ist ein deutlicher Abtrag der Fasern wahrnehmbar.

Nach einjähriger Bewitterung entstanden im Holzgefüge Risse. Bei der visuellen Begutachtung wurden alle Holzarten in den Bewertungsschlüssel 3 eingestuft, da nur Risse unter 1 mm Breite verifiziert worden waren. Die verwendeten Lärchenproben wiesen die geringsten Rissbreiten auf. Zwischen den einzelnen Bewitterungsstandorten konnten signifikante Unterschiede ermittelt werden. Besonders die Lärchenproben wiesen deutliche Differenzen zwischen dem nordamerikanischen und dem europäischen Standort auf. Der Vergleich der Farbveränderungen an unterschiedlichen Bewitterungsstandorten zeigte signifikante Unterschiede auf, hierbei wurden jedoch nur die Endwerte für die Analyse herangezogen.

Die Analyse der Datensätze der Farbmessung zeigt, dass eine Modellierung der Daten notwendig ist. Durch den Einsatz einer lokalen polynomischen Regressionsanalyse konnte eine Vergleichbar-

keit der Farbänderungen über die Zeit erreicht werden.

Die Vergrauung der Holzoberflächen ist nach einem Jahr abgeschlossen. Die Farbwerte zwischen einem und zwei Jahre wiesen nur geringfügige Unterschiede auf. Jedoch kann der Vergrauungsprozess durch den Zeitpunkt der Auslegung beeinflusst werden. Dabei wird der Prozess beschleunigt, wenn die Proben im Juni ausgelegt werden. Bei der Betrachtung aller drei Farbwerte an Holzoberflächen mit unterschiedlicher Probenausrichtung wurden keine Unterschiede ermittelt.

Durch die Simulation wurden die Einflüsse verschiedener Umwelteinflüsse dargestellt. Dadurch kann für unterschiedliche Fragestellungen die passende Umweltsimulation von Holz und Holzwerkstoffen eingesetzt werden. UV-Strahlung und UV-Strahlung mit Kondensation an der Probenoberfläche führen zu einer Reduktion der Helligkeitswerte und Zunahme der Rot- und Gelb-Anteile. Mit UV-Strahlung und Wasserbesprühung behandelte Holzoberflächen weisen fallende L^* -Werte auf. Nach anfänglicher Zunahme der a^* - und b^* -Werte verringern sich diese kontinuierlich. Durch den Einsatz von Salpetersäure oder kürzere Wechsel bei den Simulationszyklen waren vergleichbare Tendenzen bei den Farbparametern feststellbar, jedoch wurden nach gleicher Simulationsdauer unterschiedliche Werte der einzelnen Farbparameter ermittelt.

Bei den thermisch behandelten Hölzern wurden im Vergleich zu den Referenzproben deutliche Unterschiede festgestellt. Die Farbveränderungen waren geringer. Es lässt sich ein Zusammenhang zwischen Farbveränderung und Behandlungsstufe erkennen. Besonders bei Proben nach einer starken Behandlungsintensität wurden die geringsten Veränderungen festgestellt.

4.6 Visualisierung der Farbveränderungen

Durch die Analyse der Datensätze wurde eine Modellierung der Farbverschiebungen mit der Loess-Methode erreicht (Abschnitt 4.5.4). Infolgedessen wurden weitere Überlegungen in Richtung Visualisierung der Farbänderungen angestellt. Die Datengrundlage für diese Anwendung basierte auf dem Freibewitterungsversuch (1) am Standort Kuchl. Abbildung 4.80 zeigt schematisch die Visualisierung der Farbverschiebungen anhand der modellierten Farbwerte. Diese Farbwerte wurden für die Veränderung mit der Software Photoshop bearbeitet (Abschnitt 3.2.9).

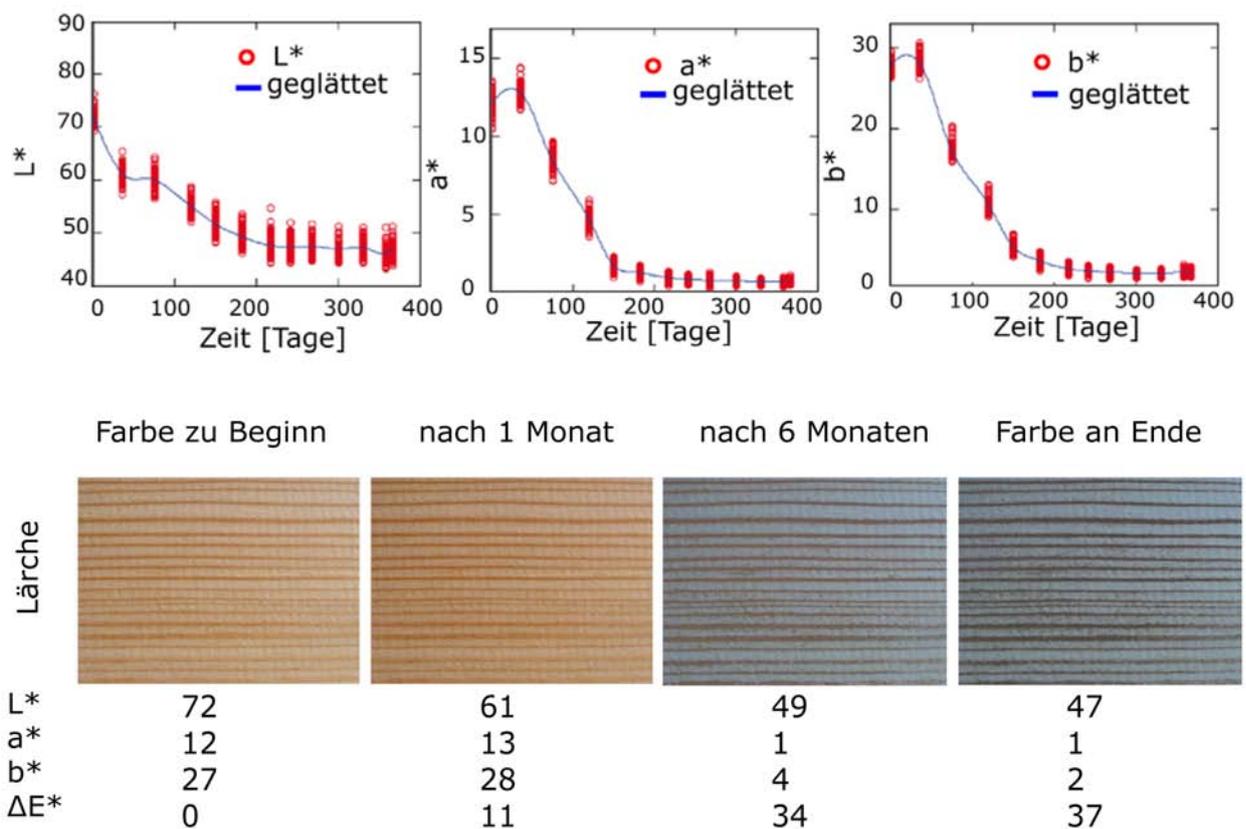


Abbildung 4.80: Schematische Darstellung der Visualisierung der Farbveränderungen einer bei natürlich bewitterten Lärchenoberfläche, oben: experimentell erhobene Daten mit Modellierungskurve, unten: Verlauf der Farbänderungen während der Bewitterungsdauer, geschätzte Farbkennwerte dienen als Grundlage der erzeugten Bilder

Anhand der Abbildung 4.81 ist zu erkennen, dass das computererzeugte Bild (Abbildung 4.80) rein visuell gut übereinstimmt. Trotzdem bestehen noch einzelne Bereiche, bei denen eine Nachbearbeitung der Visualisierung notwendig ist. Für die vorliegende Arbeit ist eine manuelle Nachbearbeitung ausreichend. In Zukunft ist aber für eine automatisierte Visualisierung die Anwendung weiterer Bildverarbeitungsmethoden empfehlenswert.



Abbildung 4.81: Detail einer einjährigen bewitterten Lärchenprobe am Standort Kuchl

Die Visualisierungsmethode wird am Beispiel einer Fassadenschalung aus Douglasien- und Lärchenholz gezeigt und ist wiederum bei den anderen Holzarten für die Bilderzeugung einsetzbar. Abbildung 4.82 zeigt die simulierten Farbänderungen bei einem Jahr Nutzungsdauer in einer praktischen Anwendung. Es sind Farbunterschiede zwischen Douglasien- und Lärchenoberflächen zu Beginn der Bewitterung zu erkennen. Ebenso die Farbverschiebungen durch die Bewitterung sind deutlich wahrzunehmen. Die erhobenen und modellierten Daten beziehen sich nur auf die Untersuchung aufgrund definierter Vorgaben (etwa südliche Ausrichtung der Proben). Eine andere Ausrichtung einer Fassade könnte unterschiedliche Farbänderungen aufweisen (Sell und Leukens 1971). Die computererzeugten Bilder weisen eine gute visuelle Übereinstimmung mit den natürlichen gealterten Probenoberflächen auf. Risse und erodierte Faserbündel konnten mit der entwickelten Methode nicht dargestellt werden. Bei der Betrachtung einer Fassadenverschalung ist die Entfernung zwischen Beobachter und Fassade meist größer, insofern spielen Risse und herausgelöste Faserbündel eine untergeordnete Rolle. Die Möglichkeit einer computerunterstützten Bilderzeugung über die Farbveränderung könnte unter anderem für Architekten und Bauherren bei Holzanwendungen im Außenbereich ein sinnvolles Planungswerkzeug sein. Die farbliche Veränderung kann abgeschätzt werden und dem Kunden in einer möglichen 3-D Anwendung vorgeführt werden. Ferner sind im Hinblick auf den vermehrten Einsatz von unbeschichtetem Holz in der Architektur (Arndt 2006) Methoden für die Visualisierung nötig.

Lärchenoberfläche

zu Beginn der Bewitterung



nach 366 Tagen Bewitterung



Douglasienoberfläche

zu Beginn der Bewitterung



nach 366 Tagen Bewitterung



Abbildung 4.82: Detail einer computerunterstützten Bilderzeugung einer Fassadenschalung aus Douglasie und Lärche zu Beginn der Montage und nach einem Jahr Nutzungsdauer

Die Modelle können im TIF-Format aus dem Photoshop exportiert und damit in zahlreiche CAD Programme importiert und dort bearbeitet werden. Mérillou und Ghazanfarpour (2008) geben einen Überblick der verschiedenen mathematischen Algorithmen und Ansätze für die Visualisierung der Alterungserscheinungen an Materialien, in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einflüsse der Umweltbedingungen. Trotzdem sind Analysen über den Alterungsprozess und deren tatsächliche Auswirkungen auf das Material sowie eine Unterscheidung zwischen gestalterischer und wissenschaftlicher Bilderzeugung von entscheidender Bedeutung. In der aktuellen Studie wurde eine einfache Vorgehensweise für die Visualisierung der Farbveränderungen verwendet. Es wurde keine Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt, da eine Zuordnung von Eigenschaften für das Material aufgrund der Forschungsfragen nicht notwendig erschien. Die hier dargestellte Modellbildung und Bilderzeugung kann somit als Grundlage für Forschergruppen dienen, die auf FEA von Holz spezialisiert sind.

Zusammenfassende Betrachtung der Visualisierung der Farbverschiebungen während der natürlichen Bewitterung

Die Visualisierung von Verwitterungserscheinungen an Holzoberflächen wird durch die Anwendung von Computerprogrammen wesentlich vereinfacht. Diese computerunterstützte Bilderzeugung von Materialoberflächen und deren Veränderungen stimmen rein visuell gut mit den tatsächlich gemessenen Veränderungen überein. Jedoch ist ein manuelles Nacharbeiten in einzelnen Teilbereichen notwendig. Durch die Weiterentwicklung der Darstellungsmethoden und mathematischen Algorithmen könnten automatisierte Systeme für die Bilderzeugung eingesetzt werden. Ein vielversprechender Ansatz könnte die Finite-Elemente-Analyse und deren Möglichkeit für die Berücksichtigung von Materialeigenschaften sein.

5 Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung über die Veränderung ausgewählter Holzeigenschaften durch unterschiedliche Prozesse kann folgendes Fazit gezogen werden:

- Eine Betrachtung der radialen und tangentialen Schnittflächen von Holz führt zu unterschiedlichen Ergebnissen bei der Farbmessung. Für die automatisierte Bestimmung von Holzmerkmalen sowie weiterer Kenngrößen ist dies zu beachten. Des Weiteren sind bei der Entwicklung einer Qualitätskontrolle über die Farbmessung mittels Fasersonden bei Prozessen wie Holz Trocknung, Dämpfung und thermischer Modifikation die erarbeiteten Erkenntnisse zu berücksichtigen.
- Durch weitere Konzentration der Produktionskapazitäten in der Holzverarbeitenden Industrie werden leistungsfähige Systeme für eine automatisierte Sortierung nach unterschiedlichen Kriterien benötigt. Untersuchungen zur Klassifizierung in Tannen- und Fichtenholz sowie Lärchen- und Douglasienholz werden durch die Leistungsfähigkeit der Farbmessung bei dieser Fragestellung aufgezeigt.
- Durch eine eindeutige Klassifizierung von thermisch modifizierten Hölzern in unterschiedliche Behandlungsstufen mittels Farbmessung kann diese Methode für eine Qualitätssicherung herangezogen werden. Als nächster Schritt könnte die Farbmessung während der thermischen Modifizierung als Prozesskontrolle und Steuerungswerkzeug weiterentwickelt werden.
- Durch die Modellierung der Farbveränderungen mittels Loess-Methode wurde eine Schätzung von Datensätzen während der zeitlichen Veränderungen der Materialeigenschaften erreicht. Folglich kann diese Methode für weitere Anwendungen im Hinblick auf die Veränderungen während eines Prozesses verwendet werden.
- Die Betrachtung der Oberfläche als ein einfaches System und deren Veränderungen durch

unterschiedliche Einflüsse zeigen nicht nur die Auswirkungen auf das Holz, sondern dienen auch als Grundlage für kompliziertere Systeme, beispielsweise beschichtete Holzoberflächen. Das erhobene Datenmaterial kann für weitere Untersuchungen mit stochastischen Methoden (z. B. Markov-Ketten und Wiener-Prozessen) herangezogen werden, bei denen die zeitliche Entwicklung von Systemen und Objekten beschrieben wird.

- Durch die Analyse der Farbveränderung über die Zeit wurde eine Berechnung der Schätzparameter ermöglicht. Dieser Umstand kann für die Implementierung der Farbwerte in eine CAD Anwendung genutzt werden, um die Visualisierung der Farbveränderungen zu erreichen. Speziell für Planer und Bauherren könnte dies ein sinnvolles Werkzeug für die Gestaltung von Objekten sein.

6 Zusammenfassung

Die Verwendung von Holz hat eine lange Tradition, es zählt zu den ältesten Baustoffen der Menschheit. Sein visueller Eindruck, die leichte Bearbeitbarkeit und das günstige Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht machen es für viele Anwendungen im Innen- und Außenbereich attraktiv.

Um den Anforderungen bestmöglich zu entsprechen und einen erweiterten Einsatzbereich von Holz zu ermöglichen, führte dies zur Entwicklung von Verfahren, die die Eigenschaften des Holzes verbessern sowie zur Definition von Qualitätsklassen. Gefordert ist aber nicht nur eine Einteilung nach Qualitätsmerkmalen, sondern eine objektive Beurteilung von Veränderungen bei der Anwendung von Holz und eine Abschätzung der Veränderungen über den Produktlebenszyklus bei unterschiedlichen Beanspruchungen.

Bei thermisch behandelten Hölzern werden je nach Behandlungsintensität dunklere Farbtöne erreicht. Die Prozessbedingungen bei einer thermischen Modifikation werden überwiegend durch Erfahrungswerte definiert. Durch Verwendung unterschiedlicher Holzarten und Holzdimensionen besteht die Gefahr einer zu geringeren oder zu starken Behandlungsintensität. Eine objektive Beurteilung des Behandlungserfolges ist dadurch schwierig.

Der Rohstoff Holz kann eine lange Gebrauchsdauer aufweisen und wer kennt nicht das grausilbrige, rohe Holz an alten Gebäuden, das seinen Objekten eine ganz besondere Ausstrahlung verleiht. Das natürliche Altern von Holzoberflächen wird von der modernen Architektur aufgegriffen. Detaillierte Aussagen über den Vergrauungsprozess oder die Farbänderungen von verschiedenen Holzarten sind nach derzeitigem Wissensstand schwierig zu treffen. Unterschiedliche Wege der Farbänderungen können bei Holz auftreten und das ästhetische Erscheinungsbild beeinflussen.

Selbst im Innenbereich verändern Holzoberflächen langsam ihre optischen Eigenschaften und somit ihre gestalterische Aussage. Das Verschieben eines Teppichs oder Umhängen eines Bildes kann diese Veränderung dann abrupt sichtbar machen. Holzarten verfärben sich meist unterschiedlich, einige werden heller und andere werden dunkler. Häufig sind die Kunden durch dieses Verhalten überrascht und fordern Informationen über das Ausmaß der Veränderungen und Hilfestellung.

Die Farbe von Materialien spielt bei vielen Anwendungen eine entscheidende Rolle und wird zur

Beurteilung von Veränderungen herangezogen. Bei der Holzmodifikation wird eine Farbänderung in Kauf genommen oder bewusst herbeigeführt. Die naturbelassene Holzfassade ist durch ein ökologisches und ökonomisches Umdenken wieder gesellschaftsfähig. Seine materialspezifischen Veränderungen bei der Verwendung machen Holz zu einem einzigartigen Werkstoff im Innen- und Außenbereich. Detaillierte Untersuchungen und Abschätzungen über Veränderungen sind für die Materialien wichtig. Damit können falsche Einsatzgebiete und Reklamationen verhindert werden und gleichzeitig die Produktqualität und die Kundenzufriedenheit erhöht werden.

Folgende Ziele der Arbeit wurden definiert:

- Bestimmung des Einflusses des Messbereiches auf die Farbmessung an Holzoberflächen
- Klassifizierung von Hölzern über Farbmessung
- Quantifizierung der Farbveränderungen von Holzoberflächen durch Lichtstrahlung
- Bestimmung der sichtbaren Veränderungen an Holzoberflächen im Außenbereich
- Analyse der unterschiedlichen Einflüsse durch die Umweltsimulation an Holzoberflächen
- Entwicklung einer Methode zur Analyse von zeitlichen Veränderungen der Materialeigenschaften
- Entwicklung einer Vorgehensweise für die Visualisierung der Farbveränderungen an Holzoberflächen

Der experimentelle Teil gliedert sich in mehrere Teiluntersuchungen, wobei die einzelnen Untersuchungen aufgrund der unterschiedlichen Fragestellungen nicht bei jeder angegebenen Holzart Anwendung fanden. Für die quantitative Bestimmung der Holzfarbe und deren Veränderungen bei den unterschiedlichen Prozessen wurde ein Spektrophotometer verwendet. Die Veränderungen durch Lichtbestrahlung hinter Fensterglas wurden an zwei Standorten gemessen. Die Freibewitterungsversuche wurden an drei Standorten durchgeführt. Bei der Umweltsimulation im Labor wurden 7 Versuchsreihen analysiert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung über die Veränderung ausgewählter Holzeigenschaften durch unterschiedliche Prozesse können wie folgend dargestellt werden:

- Die festgestellten Farbwerte an radialen und tangentialen Schnitten weisen signifikante Differenzen auf.
- Die verwendeten Douglasien- und Lärchenproben konnten anhand der Farbwerte eindeutig der jeweiligen Holzart zugeordnet werden. Bei Fichten- und Tannenholz konnten 68,7% der Proben richtig klassifiziert werden.
- Thermisch modifizierte Hölzer unterschiedlicher Behandlungsintensitäten konnten bei Verwendung der Farbwerte unterschieden und klassifiziert werden.
- Die Lichtbestrahlung hinter Fensterglas zeigte deutliche Veränderungen der Farbwerte innerhalb eines Jahres. Bei der Verwendung von zweifacher und dreifacher Verglasung wurden Unterschiede der Farbverschiebungen festgestellt.
- Die sichtbaren Auswirkungen der Bewitterungseinflüsse an den Holzoberflächen wurden nach kurzer Zeitdauer wahrgenommen. Jedoch waren die gemessenen Farbänderungen nur teilweise mit bloßem Auge erkennbar.
- Die Analyse der Rissentwicklung an verschiedenen Bewitterungsstandorten zeigte ein unterschiedliches Bild der Rissanzahl. Bei der Holzart Lärche wurde im Vergleich zu den anderen Holzarten eine geringere Rissanzahl festgestellt.
- Der zeitliche Verlauf der Farbveränderungen an den Holzoberflächen während der Freibewitterung und der Umweltsimulation im Labor sind tendenziell vergleichbar, jedoch bei der natürlichen Bewitterung stärker ausgeprägt.
- Der zeitliche Verlauf der Farbveränderungen konnte mit Hilfe der Loess-Methode modelliert werden.
- Die Visualisierung der Farbveränderungen im Außenbereich über einen Zeithorizont von einem Jahr konnte durch die Implementierung der Farbwerte in eine CAD Anwendung durchgeführt werden.

Für die Praxis kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, dass es möglich ist, die Farbe für die Klassifizierung von Hölzern und die Beurteilung von unterschiedlichen Prozessen bei der Holzverwendung einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- Anderson EL, Pawlak Z, Owen NL, Feist WC (1991a) Infrared studies of wood weathering. Part I: Softwoods. *Appl Spectrosc* 45(4):641–647
- Anderson EL, Pawlak Z, Owen NL, Feist WC (1991b) Infrared studies of wood weathering. Part II: Hardwoods. *Appl Spectrosc* 45(4):648–652
- Andrady AL, Hamid SH, Hu X, Torikai A (1998) Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. *J Photoch Photobio B* 46:96–103
- Anonymus (1995) Die Tanne zwischen Ökologie und Ökonomie. In: Argraverlag (Hg.), Österreichische Forstzeitung, S. I–XVI
- Arndt U (2006) Naturbelassenes Holz im Freien. *Detail* 46(10):1136–1140
- Ayadi N, Lejeune F, Charrier F, Charrier B, Merlin A (2003) Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz Roh Werkst* 61(3):221–226
- Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2006) *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Béarnais Barbry S, Bonneau R, Castellan A (1999) Photophysics and photochemistry of a lignin-like quinoid dimer, 4,4'-Dimethoxybiphenyl-2,5,2',5'-bisquinone, in relation to color alteration of woody material exposed to daylight. *J Phys Chem A* 103:11136–11144
- Barton FEI, Himmelsbach DS, Duckworth JH, Smith MJ (1992) Two-dimensional vibration spectroscopy: Correlation of mid- and near-infrared regions. *Appl Spectrosc* 46(3):420–429

- Batchelor D (2002) Chromophobie: Angst vor der Farbe. WUV-Universität-Verlag, Wien
- Bauer DR (2000) Interpreting weathering acceleration factors for automotive coatings using exposure models. *Polym Degrad Stabil* 69:307–316
- Bavendamm W (1963) Über die Wirksamkeit der die natürliche Resistenz der Hölzer hervorrufenden Kernstoffen. *Holz Roh Werkst* 21(11):441–446
- Beckwith JRI (1979) Theory and practice of hardwood color measurement. *Wood Sci* 11(3):169–175
- Bekhta P, Niemz P (2003) Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung* 57:539–546
- Billand F (2007) Das Holzhaus Buch. Christian Brändstätter Verlag, Wien
- Blumthaler M, Ambach W, Ellinger R (1996) UV-Bestrahlung von horizontalen und vertikalen Flächen im Hochgebirge. *Wetter und Leben* 48(1–2):25–37
- Bockhorn H (2007) Mathematical Modeling. In: Ullmann's modeling and simulation, Wiley-VCH Verlag, S. 203–306
- Borgin K, Parameswaran N, Liese W (1975) The Effect of Aging on the Ultrastructure of Wood. *Wood Sci Technol* 9(2):87–98
- Bosshard HH (1956) Über die Anisotropie der Holzschwindung. *Holz Roh Werkst* 14(8):285–295
- Bosshard HH (1984) *Holzkunde: Band 2 Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Stuttgart
- Bourgeois PJ, Janin G, Guyonnet R (1991) The color measurement: A fast method to study and to optimize the chemical transformations undergone in the thermally treated wood. *Holzforschung* 45(5):377–382
- Bowyer JL, Shmulsky R, Haygreen JG (2003) *Forest products and wood science: An introduction*. Iowa State Press, Ames, Iowa

- Brischke C, Welzbacher CR, Brandt K, Rapp AO (2007) Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b* color data homogenized wood samples. *Holzforschung* 61(1):19–22
- Brown RP (1995) Predictive techniques and models for durability tests. *Polym Test* 14:403–414
- Brunner CC, Maristany AG, Butler DA (1996a) Wood species identification using spectral reflectance. *Forest Prod J* 46(2):82–85
- Brunner CC, Maristany AG, Butler DA (1996b) Wood species identification using spectral reflectance. *Forest Prod J* 46(2):82–85
- Brunner CC, Shaw GB, Butler DA, Funck JW (1990) Using color in machine vision systems for wood processing. *Wood Fiber Sci* 22(4):413–428
- Butin H (1991) Mykologische Untersuchungen an vergrauten Holzoberflächen im Gebirge. *Holz Roh Werkst* 49:235–238
- Butler DA, Brunner CC, Funck JW (2001) Wood–surface feature classification using extended–color information. *Holz Roh Werkst* 59:475–482
- Castellan A, Nourmamode A, Jaeger C (1993) Photochemistry of methoxy–p–benzoquinone and methoxyhydroquinone in solid 2–hydroxypropylcellulose films and on filter paper.: UV/Vis absorption and diffuse reflectance spectroscopy study. *Nord Pulp Paper Res* 8(2):239–257
- Chang HT, Chang ST (2001) Correlation between softwood discoloration induced by accelerated lightfastness testing and by indoor exposure. *Polym Degrad Stabil* 72(2):361–365
- Charrier B, Haluk JP, Janin G (1992) Prevention of brown discoloration in European oakwood occurring during kiln drying by a vacuum process: Colorimetric comparative study with a traditional process. *Holz Roh Werkst* 50(11):433–437
- Charrier B, Haluk JP, Metche M (1995) Characterization of european oakwood constituents acting in the brown discolouration during kiln drying. *Holzforschung* 49:168–172

- Chow SZ, Mukai HN (1972) Effect of thermal degradation of cellulose on wood–polymer bonding. *Wood Sci* 4(4):208–208
- Cleveland WS (1979) Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *J Am Stat Assoc* 74(368):829–836
- Colom X, Carrillo F, Nogués F, Garriga P (2003) Structural analysis of photodegraded wood by means of FTIR spectroscopy. *Polym Degrad Stabil* 80:543–549
- Creemers J, Meijer Md, Zimmermann T, Sell J (2002) Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. *Holz Roh Werkst* 60(6):411–420
- Cui W, Kamdem DP, Rypstra T (2004) Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFT) and color changes of artificial weathered wood. *Wood Fiber Sci* 36(3):291–301
- Dellus V, Mila I, Scalbert A, Menard C, Michon V, Herve du Penhoat C (1997) Douglas–fir polyphenols and heartwood formation. *Phytochemistry* 45(8):1573–1578
- Derbyshire H, Miller ER, Turkulin H (1995) Investigations into the photodegradation of wood using microtensile testing Part 1: The application of microtensile testing to measurement of photodegradation rates. *Holz Roh Werkst* 53(1):339–345
- Desai RL, Shields JA (1969) Photochemical Degradation of Cellulose Material. *Makrom Chem* 122(1):134–144
- Devantier B, Emmler R (1997) Das Farbänderungsverhalten beschichteter Holzoberflächen: Ein Vergleich von Belichtungsverfahren und Bewertungssystemen ermöglicht eine Auswahl in Abhängigkeit von der Holzart. *Farbe + Lack* 103(4):195–203
- Devantier B, Knitsch HW, Macht KH, Emmler R, Böttcher P, Heinskill J (1993) Erarbeitung eines Anwenderkataloges für Holz auf der Grundlage farbmetrischer Untersuchungen der Farbänderung durch die Einwirkung von Licht. IHD–Dresden (Hg.), Dresden
- Donath S, Militz H, Mai C (2004) Wood modification with alkoxy-silanes. *Wood Sci Technol* 38:555–566

- Donath S, Militz H, Mai C (2007) Weathering of silane treated wood. *Holz Roh Werkst* 65:35–42
- Ebner M (2004) Farbe und Holz – Eine ästhetische Betrachtung. Farbe bekennen ... *Holz Bildung Forschung* 56(1):14–16
- Ekstedt J (2002) Field performance of painted chemically modified wood: Bio–deterioration of coated wood – Coating and Substrate in the frame of COSTA E 18 Joint Working Group Meeting 4th April 2002, Lisbon, Portugal
- Esteves B, António Velez A, Domingos I, Pereira H (2008) Heat–induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Sci Technol* 42:369–384
- Evans PD (1989) Effect of angle of exposure on the weathering of wood surfaces. *Polym Degrad Stabil* 24:81–87
- Evans PD, Banks WB (1988) Degradation of wood surfaces by water – Changes in mechanical properties of thin wood strips. *Holz Roh Werkst* 46:427–435
- Evans PD, Michell AJ, Schmalzl KJ (1992) Studies of the degradation and protection of wood surfaces. *Wood Sci Technol* 26:151–163
- Evans PD, Urban K, Chowdhury MJA (2008) Surface checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. *Wood Sci Technol* 42(3):251–265
- Evans PD, Wallis AFA, Owen NL (2000) Weathering of chemically modified wood surfaces. Natural weathering of Scots pine acetylated to different weight gains. *Wood Sci Technol* 34:151–165
- Fahrmeir L, Kneib T, Lang S (2007a) *Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Fahrmeir L, Künstler R, Pigeot I, Tutz G (2007b) *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Faix O, Böttcher JH (1992) The influence of particle size and concentration in transmission and diffuse reflectance spectroscopy of wood. *Holz Roh Werkst* 50:221–226

- Faix O, Németh K (1988) Monitoring of wood photodegradation by DRIFT-spectroscopy. Holz Roh Werkst 46:112
- Feist WC, Hon DNS (1984) Chemistry of weathering and protection. In: Rowell RM (Hg.), The chemistry of solid wood, ACS, S. 401–574
- Feist WC, Mraz EA (1978) Comparison of Outdoor and Accelerated Weathering of Unprotected Softwoods. Forest Prod J 28(3):38–43
- Fengel D (1966a) Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C – Erste Mitteilung: Heiß- und Kaltwasserextrakte von thermisch behandeltem Fichtenholz. Holz Roh Werkst 24(1):9–14
- Fengel D (1966b) Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C – Zweite Mitteilung: Die Hemicellulosen in unbehandeltem und in thermisch behandeltem Fichtenholz. Holz Roh Werkst 24(3):98–109
- Fengel D, Przyklenk M (1970) Über die Veränderung des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C. Fünfte Mitteilung: Einfluß einer Wärmebehandlung auf das Lignin in Fichtenholz. Holz Roh Werkst 28(7):254–263
- Fengel D, Wegener G (2003) Wood Chemistry Ultrastructure Reactions. Verlag Kessel, Remagen
- Franke W (1993) Mikroskopische und photometrische Verfahren. Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff, Springer, Berlin, Heidelberg
- Frevert T, Klemm O (1984) Wie ändern sich pH-Werte im Regen- und Nebelwasser beim Abtrocknen auf Pflanzenoberflächen? Meteorol Atmos Phys 34:75–81
- Frieling H (2005) Farbe hilft verkaufen: Farbenlehre und Farbenpsychologie für Handel und Werbung. Muster-Schmidt, Göttingen
- Fusseder H (2003) Holzoberflächenbehandlung. Rösler, Augsburg
- Futó LP (1974) Der photochemische Abbau des Holzes als Präparations- und Analysenmethode. Holz Roh Werkst 32(8):303–311

- Futó LP (1976) Einfluß der Temperatur auf den photochemischen Holzabbau. 1. Mitteilung: Experimentelle Darstellung. Holz Roh Werkst 34(1):31–36
- George B, Suttie E, Merlin A, Deglise X (2005) Photodegradation and photostabilisation of wood – the state of the art. Polym Degrad Stabil 88(2):268–274
- Giebeler E (1983) Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. Holz Roh Werkst 41:87–94
- Gierlinger N, Jacques D, Grabner M, Wimmer R, Schwanninger M, Rozenberg P, Pâques LE (2004) Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. Trees – Struct Funct 18(1):102–108
- Glos P, Burger N (1998) Maschinelle Sortierung von frisch eingeschnittenem Schnittholz. Holz Roh Werkst 56:319–329
- Glos P, Richter K, Diebold R (2006) Maschinelle Sortierung von Brettern aus den Holzarten Lärche und Douglasie. Holzforschung München, München
- Glos P, Schulz H (1980) Stand und Aussichten der maschinellen Schnittholzsortierung. Holz Roh Werkst 38:409–417
- Goldstein IS (1984) Degradation of Wood by Chemicals. In: Rowell RM (Hg.), The chemistry of solid wood, ACS, S. 575–586
- Grosser D (2003) Die Hölzer Mitteleuropas. Verlag Kessel, Remagen
- Grosser D, Zimmer B (2000) Informationsdienst Holz: Einheimische Nutzhölzer und ihre Verwendung. DGfH, München
- Guseva O, Lichtblau A (2005) Application of smoothing methods for estimation of service life for polymers from tensile testing. Polym Test 24:718–727
- Hagman O (1997) Multivariate prediction of wood surface features using an imaging spectrograph. Holz Roh Werkst 55:377–382
- Hamid HS, Amin BM (1995) Lifetime prediction of polymers. J Appl Polym Sci 55:1385–1394

- Hanger J, Huber H, Lackner R, Wimmer R, Fellner J (2002a) Verbesserung der natürlichen Dauerhaftigkeit von wärmebehandelter Fichte, Kiefer und Buche. *Holzforsch Holzverw* 54(5):111–113
- Hanger J, Huber H, Lackner R, Wimmer R, Fellner J (2002b) Verbesserung der natürlichen Dauerhaftigkeit von wärmebehandelter Fichte, Kiefer und Buche. *Holzforsch Holzverw* 54(6):92–93
- Hartler N, Norrström H (1969) Light-Absorbing Properties of Pulp and Pulp Components. III. Kraft Pulp. *Tappi* 52(9):1712–1715
- Hartung J, Elpelt B (1999) *Multivariate Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg, München
- Hartung J, Elpelt B, Klösener KH (2002) *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. Oldenbourg, München
- Hayoz P, Peter W, Rogez D (2003a) A new innovative stabilization method for the protection of natural wood. *Prog Org Coat* 48:297–309
- Hayoz P, Peter W, Rogez D (2003b) Und es bleibt wie es ist. Farbstabilisierung und Lichtschutz bei naturbelassenen und gebeizten Hölzern für den Innenbereich. *Farbe + Lack* 109(7):26–33
- Hill CAS (2006) *Wood modification: Chemical, thermal and other processes*. Wiley series in renewable resources, Wiley, Chichester
- Hill CAS, Mastery Farahani MR, Hale MDC (2004) The use of organo alkoxy silane coupling agents for wood preservation. *Holzforschung* 58:316–325
- Hogl K, Schwarzbauer P (2002) Chancen für modifiziertes Holz in ausgewählten Marktsegmenten. In: Teischinger A (Hg.), *Modifiziertes Holz – Eigenschaften und Märkte*, Universität für Bodenkultur, Band 3 von LIGNOVISIONEN, S. 221–251
- Hon DNS (1994) Degradative effects of ultraviolet light and acid rain on wood surface quality. *Wood Fiber Sci* 26(2):185–191
- Hon DNS, Chang ST (1984) Surface degradation of wood by ultraviolet light. *J Polymer Sci Polymer Chem Ed* 22:2227–2241

- Hon DNS, Feist WC (1981) Free radical formation in wood: The role of water. *Wood Sci* 14(1):41–48
- Hon DNS, Feist WC (1986) Weathering characteristics of hardwood surfaces. *Wood Sci Technol* 20(2):169–183
- Hon DNS, Ifju G (1978) Measuring penetration of light into wood by detection of photo-induced free radicals. *Wood Sci* 11(2):118
- Hon DNS, Minemura N (2001) Color and Discoloration. In: Hon DNS, Shiraishi N (Hg.), *Wood and cellulosic chemistry*, Dekker, S. 385–442
- Hon DNS, Shiraishi N (Hg.) (1991) *Wood and cellulosic chemistry*. Dekker, New York
- Hon NS (1976a) Formation of free radicals in photoirradiated cellulose and related compounds. *J Polymer Sci Polymer Chem Ed* 14(10):2513–2525
- Hon NS (1976b) Fundamental degradation process relevant to solar irradiation of cellulose: ESR studies. *J Macromol Sci Pure Appl Chem* 10(6):1175–1192
- Horn BA, Qiu J, Owen NL, Feist WC (1994) FT-IR Studies of Weathering Effects in Western Redcedar and Southern Pine. *Appl Spectrosc* 48(6):662–668
- Huth P (2006) Die Absatzentwicklung von Thermobuche in Deutschland: 3. Europäischer Thermoholz-Workshop, 03.02.2006, IHD-Dresden, Leipzig
- Imamura Y (1993) Morphological changes in acetylated wood exposed to weathering. *Wood Research : Bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University* 79:54–61
- Jacoby WC (2000) Loess: A nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Elect Stud* 19:577–613
- Jaeger C, Nourmamide A, Castellan A (1993) Photodegradation of Lignin: A Photochemical Study of Phenolic Coniferyl Alcohol Lignin Model Molecules. *Holzforschung* 47:375–390
- Johansson D, Morén T (2006) The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz Roh Werkst* 64:104–110

- Junghans K, Niemz P (2006) Behandlungsintensität bestimmt Thermoholzqualität: Dichte und Härte des Holzes nehmen mit zunehmender Behandlungsintensität ab –Ausgleichsfeuchte reduziert. Holz-Zentralbl (14):412
- Kataoka Y, Kiguchi M (2001) Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. J Wood Sci 47:325–327
- Kataoka Y, Kiguchi M, Williams RS, Evans PD (2007) Violet light causes photodegradation of wood beyond the zone affected by ultraviolet radiation. Holzforschung 61(1):23–27
- Kaufmann H (2001) Hineinverwittern in die Landschaft. Zuschnitt 1(4):18–19
- Kleinert TN (1964) Free radical reaction in UV irradiation of cellulose. Holzforschung 18(1–2):24–28
- Kleinert TN (1970) Physikalische–chemische Holzveränderungen im Freien. Holzforsch Holzverw 22(2):21–24
- Kline DE, Surak C, Araman PA (2003) Automated hardwood lumber grading utilizing a multiple sensor machine vision technology. Comput Electron Agr 41(1–3):139–155
- Klumpers J, Scalbert A, Janin G (1994) Ellagitannins in european oak wood: Polymerization during wood ageing. Phytochemistry 36(5):1249–1252
- Košíková B, Tolvaj L (1998) Characterization of lignin fractions isolated from photodegraded wood (*Populus grandis*). Drevársky Výskum (Wood Research) 43(2):19–28
- Kringstad KP, Lin SY (1970) Mechanism in the yellowing of high-yield pulps by light: Structure and reactivity of free radical intermediates in the photodegradation of lignin. Tappi 53(12):2296–2301
- Kühne H, Leukens U, Sell J, Wälchli O (1970) Untersuchungen an bewitterten Holzoberflächen – Erste Mitteilung: Raster-elektronenmikroskopische Beobachtungen an Vergrauungspilzen. Holz Roh Werkst 28(6):223–229

- Kuo ML, Hu N (1991) Ultrastructural changes of photodegradation of wood surfaces exposed to UV. *Holzforschung* 45(5):347–353
- Küppers H (2000) *Harmonielehre der Farben: Theoretische Grundlagen der Farbgestaltung*. DuMont, Köln
- Kučera LJ, Sell J (1987) Die Verwitterung von Buchenholz im Holzstrahlbereich. *Holz Roh Werkst* 45(3):89–93
- Lanzalunga O, Bietti M (2000) Photo- und radiation chimica induced degradation of lignin model compounds. *J Photoch Photobio B* 56:85–105
- Leary GJ (1967) The Yellowing of Wood by Light. *Tappi* 50(1):17–19
- Leary GJ (1968) The Yellowing of Wood by Light: Part II. *Tappi* 51(6):257–260
- Li C, Ragauskas AJ (2000) Brightness reversion of mechanical pulps. Part XVII: Diffuse reflectance study on brightness stabilization by additives under various atmospheres. *Cellulose* 7:369–385
- Liu J, Furuno T (2001) The fractal evaluation of wood texture by the triangular prism surface area method. *Wood Fiber Sci* 33(2):213–222
- Liu J, Furuno T (2002) The fractal estimation of wood color variation by the triangular prism surface area method. *Wood Sci Technol* 36:385–397
- Loidl D (2006) *Alterungsverhalten polymerer Werkstoffe: Reihe – Wechselwirkungen moderner Werkstoffe mit der Umwelt*, 30.11.2006, ÖGUS, Wien
- Mandel J (1984) *The statistical analysis of experimental data*. Dover Publ., New York
- Mantau U, Kaiser C (2002a) *Holzeinsatz im Modernisierungsmarkt – Nichtwohnbau*. Holzabsatzfonds (Hg.), Celle
- Mantau U, Kaiser C (2002b) *Holzeinsatz im Modernisierungsmarkt – Wohnungsbau*. Holzabsatzfonds (Hg.), Celle

- Maristany AG, Lebow PK, Brunner CC (1994) Application of the dichromatic reflection model to wood. *Wood Fiber Sci* 26(2):249–258
- Mayer H (1992) *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlagen*. Gustav Fischer, Stuttgart, Jena und New York
- McCullagh P, Nelder JA (1999) *Generalized Linear Models*. Chapman & Hall/CRC, Boca Roton, London, New York, Washington D.C.
- Mérillou S, Ghazanfarpour D (2008) A survey of aging and weathering phenomena in computer graphics. *Comput Graph* 32:159–174
- Michell AJ, Schimleck L (1996) NIR Spectroscopy of woods from *Eucalyptus globulus*. *Appita J* 49(1):23–26
- Militz H (1991) Die Verbesserung des Schwind- und Quellverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Holz mittels Behandlung mit unkatalysiertem Essigsäureanhydrid. *Holz Roh Werkst* 49:147–152
- Militz H (2000) Alternative Schutz- und Behandlungsverfahren: 22. Holzschutz-Tagung vom 17.–18.10.2000, DGfH, Bad Kissingen
- Militzer K, Seyfarth R, Devantier B, Emmeler R (2000) Objektives Bewertungsverfahren der Verfärbung beim Dämpfen von Schnittholz. TU-Dresden, IHD-Dresden (Hg.), Dresden
- Mitsui K (2004) Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 2. Effect of light-irradiation time and wavelength. *Holz Roh Werkst* 62(1):23–30
- Mitsui K, Murata A, Tolvaj L (2004) Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy. *Holz Roh Werkst* 62(3):164–168
- Morgan JWW, Orsler RJ (1968) The chemistry of colour changes in wood: I. The significance of stilbenes. *Holzforschung* 22:11–16
- Müller U, Rätzsch M, Schwanninger M, Steiner M, Zöbl H (2003) Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation. *J Photoch Photobio B* 69:97–105
- Nassau K (2001) *The physics and chemistry of color: The fifteen causes of color*. Wiley, New York

- Niemz P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verl, Leinfelden-Echterdingen
- Nimz H (1974) Das Lignin der Buche – Entwurf eines Konstruktionsschemas. *Angew Chem* 86(9):336–344
- Norrström H (1969) Light absorbing properties of pulp and pulp components. Part 1. Method. *Svensk Papperstidning* 72(2):25–38
- Nuopponen MH, Wikberg H, Vuorinen T, Maunu SL, Jämsä S, Vittaniemi P (2004) Heat-treated softwood exposed to weathering. *J Appl Polym Sci* 91:2128–2134
- Nyström J, Hagman O (1999) Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies*. *J Wood Sci* 45:30–47
- Oelhafen M, Niemz P, Hurst A (2006) Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Esche und Rotbuche mit dem Ziel der Farbänderung: Teil2: Optische Eigenschaften. *Holztechnologie* 47(3):19–24
- Oltean L, Teischinger A, Hansmann C (2008) Wood surface discolouration due to simulated indoor sunlight exposure. *Holz Roh Werkst* 66:51–56
- Pandey KK (2005a) A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. *Polym Degrad Stabil* 87:375–379
- Pandey KK (2005b) Study of the effect of photo-irradiation on the surface chemistry of wood. *Polym Degrad Stabil* 90:9–20
- Papadopoulos A, Hill CAS (2002) The biological effectiveness of wood modified with linear chain carboxylic acid anhydrides against *Coniophora puteana*. *Holz Roh Werkst* 60:329–332
- Parham R, Gray R (1984) Formation and Structure of Wood. In: Rowell RM (Hg.), *The chemistry of solid wood*, ACS, S. 3–54
- Pastore TCM, Santos KO, Rubim JC (2004) A spectrophotometric study on the effect of ultraviolet irradiation of four tropical hardwoods. *Bioresource Technol* 93:37–42

- Pecina H, Paprzycki O (1990) Untersuchungen über die Benetzbarkeit chemisch modifizierter Hölzer. *Holz Roh Werkst* 48(2):61–65
- Pichler T, Nicolussi K (2006) Zur Bauentwicklung auf der Obermairalm am Fuchsberg: Ergebnisse dendrochronologischer Analysen. *Der Schlern* 80(4):20–27
- Pietschmann J, Crewdson M, Pausch G (2007) Outdoors weathering versus accelerated tests – are correlations possible? In: Reichert T (Hg.), *Artificial weathering of wooden surfaces evaluated by colour measurement and near infrared spectroscopy*, Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. GUS, 3rd European weathering symposium, S. 233–242
- Plackett DV, Dunningham E, Singh AP (1992) Weathering of chemically modified wood. Accelerated weathering of acetylated radiata pine. *Holz Roh Werkst* 50(4):135–140
- Plinke W (1999) Kritische Augen mit dem schnellen Farbblick – Für die Online-Farbanalyse an Holzprodukten und Holzoberflächen stehen eine Reihe unterschiedlicher Methoden zur Wahl. *Holz-Zentralbl* 106:1386
- Pöckel J (2007) *Neue Methoden der Laubholzvergütung*. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien
- Podgorski L, Arnold M, Hora G (2003) A reliable artificial weathering test for wood coatings. In: Reichert T, Halafka S (Hg.), *1st European Weathering Symposium EWS*, Gesellschaft für Umweltsimulation e.V., S. 259–278
- Polcin J (1793) *Der Mechanismus der reduktiven und oxydativen Entfärbung des Holzes*. *Zellstoff und Papier* 8:226–232
- Polcin J, Rapson WH (1969) The Interpretation of UV and Visible Spectrum of Lignin. *Pulp Paper Mag Can* 70:99–106
- Polley H, Hennig P, Schwitzgebel F (2005) *Die zweite Bundeswaldinventur: Der Inventurbericht*. Berlin
- Polley H, Kroiher F (2006) *Struktur und regionale Verteilung des Holzvorrates und des potentiellen Rohholzaufkommens in Deutschland im Rahmen der Clusterstudie Forst- und Holzwirtschaft*.

Eberswalde

Popper R, Bariska M (1972) Die Azylierung des Holzes – Erste Mitteilung: Wasserdampf-Sorptionseigenschaften. Holz Roh Werkst 30(8):289–294

Popper R, Bariska M (1975) Acylierung des Holzes – 3. Mitteilung: Quellungs- und Schwindungseigenschaften. Holz Roh Werkst 33(11):415–419

Prem J (2004) Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich: Österreichischer Waldbericht – Datensammlung. Wien

Putz R, Pöckel J, Grabner M (2007) Hygrothermische Farbmodifikation von Laub-Massivholz – Brücke zwischen Rohstoff über Weiterverarbeitung bis zum Kunden: Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Fabrik der Zukunft". Wien

Rapp AO, Augusta U (2000) Dauerhaftigkeit in den Gefährdungsklassen unter besonderer Berücksichtigung von Lärchen- und Douglasien Kernholz. In: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (Hg.), 22. Holzschutz-Tagung der DGfH am 17. und 18. Oktober 2000 in Bad Kissingen.: Maßnahmen zum Schutz des Holzes., S. 21–32

Rapp AO, Sailer M, Westin M (2000) Innovative Holzvergütung – neue Einsatzbereiche für Holz. In: Holzart 2000, Conradin M (Hg.), Holz A–R–T 2000: Architecture – Research – Technology, SAH, S. 153–160

Reigbert R (1998) Zur Farbvermessung von Furnieren bei der Eingangskontrolle: Der Nutzen ist umstritten – ein Erfahrungsbericht. Holz-Zentralbl 124(67):1006

Rice J, Kozak RA, Meitner MJ, Cohen DH (2006) Appearance wood products and psychological well-being. Wood Fiber Sci 38(4):644–659

Rinnhofer A (2004) Farbmessung auf Holzoberflächen. Farbe als Qualitätsmerkmal. Holz Bildung Forschung 56(1):4–5

Rinnhofer A, Benesova W, Jakob G, Benes R (2003) Color of wood under various conditions of illumination. In: IUFRO (Hg.), 5rd International Conference on Image Processing and Scanning of Wood, S. 55–66

- Rodeck B, Meerwein G, Mahnke FH (2002) Mensch, Farbe, Raum: Grundlagen der Farbgestaltung in Architektur, Innenarchitektur, Design und Planung. Koch, Leinfelden
- Roux ML, Wozniak E, Miller ER, Boxall J, Böttcher P, Kropf F, Sell J (1988) Natural weathering of various surface coatings on five species at four European sites. Holz Roh Werkst 46(5):165–170
- Rowell RM (1991) Chemical modification of wood. In: Hon DNS, Shiraishi N (Hg.), Wood and cellulosic chemistry, Dekker, S. 703–765
- Runkel ROH (1951) Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Erste Mitteilung. Holz Roh Werkst 9(2):41–53
- Runkel ROH, Wilke KD (1951) Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz. Zweite Mitteilung. Holz Roh Werkst 9(7):260–270
- Rusche H (1973) Die thermische Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 200°C – Erste Mitteilung: Festigkeitseigenschaften von trockenem Holz nach thermischer Behandlung. Holz Roh Werkst 31:273–281
- Sandberg D (1999) Weathering of radial and tangential wood surfaces of pine and spruce. Holzfor- schung 53(4):355–364
- Sandberg D (2005) Distortion and visible crack formation in green and seasoned timber: influence of annual ring orientation in the cross section. Holz Roh Werkst 63:11–18
- Sandermann W, Augustin H (1963a) Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz: Erste Mitteilung: Stand der Forschung. Holz Roh Werkst 21(7):256–265
- Sandermann W, Augustin H (1963b) Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz: Zweite Mitteilung: Untersuchungen mit Hilfe der Differential-Thermo-Analyse. Holz Roh Werkst 21(8):305–315
- Sandermann W, Augustin H (1964) Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz: Dritte Mitteilung: Chemische Untersuchung des Zersetzungsablaufs. Holz Roh Werkst 22(10):377–386

- Sandermann W, Lüthgens M (1953) Untersuchungen über die Verfärbungen von Hölzern. Holz Roh Werkst 11(11):435–440
- Sandermann W, Schlumbom F (1962a) Über die Wirkung gefilterten ultravioletten Lichtes auf Holz – Erste Mitteilung: Photometrische und chromatographische Untersuchungen an Holzmehlen. Holz Roh Werkst 20(7):245–252
- Sandermann W, Schlumbom F (1962b) Über die Wirkung gefilterten ultravioletten Lichtes auf Holz – Zweite Mitteilung: Änderung von Farbwert und Farbempfindung an Holzoberflächen. Holz Roh Werkst 20(8):285–291
- Sauter UH (1992) Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau
- Schimleck LR, Wright PJ, Michell AJ, Wallis AF (1997) Near-infrared spectra and chemical compositions of *E. globulus* and *E. nitens* plantation woods. *Appita J* 50(1):40–46
- Schmatz F, Zobernig H (1995) Farbenlehre. Künstlerbücher, Springer, Wien
- Schmidt O (2006) Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use. Springer, Berlin, Heidelberg
- Schnabel T (2003) Untersuchungen zu Beschichtungssystemen auf acetylierten Holzoberflächen. Diplomarbeit. Fachhochschule Salzburg, Kuchl
- Schnabel T, Zimmer B, Petutschnigg AJ, Schönberger S (2007) An approach to classify thermally modified hardwoods by color. *Forest Prod J* 57(9):105–110
- Schneider A (1966) Der Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200°C und von Wasserlagerung bis 100°C auf den spektralen Remissionsgrad verschiedener Hölzer. Holz Roh Werkst 24(11):542–547
- Schneider A (1973) Zur Konvektionstrocknung von Schnittholz bei extrem hohen Temperaturen. Zweite Mitteilung: Trocknungsschäden, Sorptions-, Farb- und Festigkeitsänderungen von

- Kiefern–Splint– und Buchenholz bei Trocknungstemperaturen von 110 bis 180°C. Holz Roh Werkst 31(5):198–206
- Schober KP, Lackner C (2004) Fassadenplanung. Holzfassaden optimal ausgeführt. Mikado (3):20–24
- Schöftner J (1989) Die Verfärbung von Holz durch Licht. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien
- Schütt P, Lang UM (1991) Tannenarten Europas und Kleinasiens. Birkhäuser, Basel
- Sèbe G, Brook MA (2001) Hydrophobization of wood surfaces: covalent grafting of silicone polymers. Wood Sci Technol 35:269–282
- Seeling U (2007) Red heartwood handbook. AIDIMA Wood Furniture and Packaging Technology Inst., Paterna
- Sell J (1968) Untersuchungen über die Besiedelung von unbehandeltem und angestrichenem Holz durch Bläuepilze. Holz Roh Werkst 26(6):215–222
- Sell J (1975) Grundsätzliche Anforderungen an Oberflächenbehandlungen für Holz im Außenbau (Literaturübersicht). Holz Roh Werkst 33(9):336–340
- Sell J, Leukens U (1971) Untersuchungen an bewitterten Holzoberflächen. Zweite Mitteilung: Verwitterungserscheinungen an ungeschützten Hölzern. Holz Roh Werkst 29(1):23–31
- Selli E, Beltrame PL, Testa G, Bonfatti AM, Rossi E, Seves A (1998) Kinetic studies on the accelerated aging of cellulosic materials. Macromol Mater Eng 257:63–69
- Shafizadeh F (1984) The chemistry of pyrolysis and combustion. In: Rowell RM (Hg.), The chemistry of solid wood, ACS, S. 489–529
- Silvestrini N, Fischer EP, Stromer K (2005) Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft. DuMont, Köln
- Simms JA (1987) Acceleration shift factor and its use in evaluating weathering data. J Coat Technol 59(748):45–53

- Sivonen H, Maunu SL, Sundholm F, Jämsä S, Vittaniemi P (2002) Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 56:648–654
- Sjöström E (1993) *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. Academic Press, San Diego
- Steckert C (2003) Ein Farbbildanalyse-System zur Quantifizierung optischer Veränderungen auf dekorativen Beschichtungen nach Freibewitterung. Logos-Verl., Berlin
- Stimm B, Dong PH (2001) Der Douglasien – Herkunftsversuch Kaiserslautern nach neun Jahrzehnten Beobachtung. *Forstw Cbl* 120:173–186
- Stingl R, Patzelt M, Teischinger A (2002) Ein- und Rückblick in ausgewählte Verfahren der thermischen Modifikation. In: Teischinger A (Hg.), *Modifiziertes Holz – Eigenschaften und Märkte*, Universität für Bodenkultur, LIGNOVISIONEN, S. 57–99
- Sudiyani Y, Tsujiyama Si, Imamura Y, Takahashi M, Minato K, Kajita H (1999) Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering. *J Wood Sci* 45(4):348–353
- Sullivan JD (1967a) Color Characterization of Wood: Color Parameters of Individual Species. *Forest Prod J* 17(8):25–29
- Sullivan JD (1967b) Color characterization of wood: Spectrophotometry and wood color. *Forest Prod J* 17(7):43–48
- Sundqvist B (2002) Wood color control during kiln-drying. *Forest Prod J* 52(2):30–37
- Szymani RS, McDonald KA (1981) Defect detection in lumber: state of the art. *Forest Prod J* 31(11):34–44
- Teuffel K, Kastrup M (1998) Die Douglasie in Baden-Württemberg. *AFZ/Der Wald* :283–287
- Tjeerdsma BF, Militz H (2005) Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hadrothermal and dry heat-treated wood. *Holz Roh Werkst* 63:102–110
- Tolvaj L, Faix O (1995) Artificial ageing of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIEL*a*b* color measurements. *Holzforschung* 49(5):397–404

- Tolvaj L, Mitsui K (2005) Light source dependence of the photodegradation of wood. *J Wood Sci* 51:468–473
- Tsuchikawa S, Inoue K, Mitsui K (2004) Spectroscopic monitoring of wood characteristics variation by light-irradiation. *Forest Prod J* 54(11):71–76
- Vesey D, Luxgrant R, Pattison L, Roberts R, Quill J (2007) Xenon arc automotive test methods: a correlation study. In: Reichert T (Hg.), *Artificial weathering of wooden surfaces evaluated by colour measurement and near infrared spectroscopy*, Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. GUS, 3rd European weathering symposium, S. 259–274
- Vintila E (1939) Untersuchungen über Raumgewicht und Schwindmaß von Früh- und Spätholz bei Nadelhölzern. *Holz Roh Werkst* 2(10):345–357
- Vogl G (1999) *Umweltsimulation für Produkte*. Vogel, Würzburg
- Völz HG (2001) *Industrielle Farbprüfung: Grundlagen und Methoden*. Wiley-VCH, Weinheim
- Wachtendorf V, Geburtig A, Trubiroha P, Schulz U (2007) Artificial weathering including acidic deposition. In: Reichert T (Hg.), *Artificial weathering of wooden surfaces evaluated by colour measurement and near infrared spectroscopy*, Gesellschaft für Umweltsimulation e.V. GUS, 3rd European weathering symposium, S. 487–500
- Wagenführ R (2000) *Holzatlas*. Hanser Verl., Leipzig
- Webb DA, Sullivan JD (1964) Surface effect of light and water on wood. *Forest Prod J* 14(11):531–534
- Williams RS (1991) Effects of acidic deposition on painted wood: A review. *J Coat Technol* 63(800):53–73
- Williams RS, Knaebe MT, Feist WC (2001) Erosion rates of wood during natural weathering: Part I. Effects of grain angle and surface texture. *Wood Fiber Sci* 33(1):31–42
- Wimmer R, Teischinger A (2004) Änderung der Farbe durch Prozessführung. Trocknen und Dämpfen. *Holz Bildung Forschung* 56(1):8–9

- Windeisen E, Strobel C, Wegener G (2007) Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Sci Technol* 41:523–536
- Windeisen E, Wegener G, Zimmer B, Bächle H (2008) Relations between the chemical changes and properties of thermally modified wood: EWLP 2008, 26.08.2008, Stockholm
- Wolf A (2006) Untersuchungen von Einflussfaktoren der künstlichen Bewitterung auf Holzoberflächen. Diplomarbeit. Fachhochschule Salzburg, Kuchl
- Wu Y, Tsuchikawa S, Hayashi K (2005) Application of near infrared spectroscopy to assessments of colour change in plantation-grown *Eucalyptus grandis* wood subjected to heat and steaming treatments. *J Near Infrared Spec* 13:371–376
- Wypych G (2003) Handbook of material weathering. Chem-Tec Publishing, Toronto
- Wyszecki G, Stiles WS (2000) Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley & Sons, New York, Second Edition Auflage
- Xie Y, Krause A, Militz H, Turkulin H, Richter K, Mai C (2007) Effect of treatments with 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy-ethyleneurea (DMDHEU) on the tensile properties of wood. *Holzfor-schung* 61(1):43–50
- Yeh TF, Chang Hm, Kadla JF (2004) Rapid prediction of solid wood lignin content using transmittance near-infrared spectroscopy. *J Agr Food Chem* 52(6):1435–1439
- Youngquist JA, Rowell RM, Krzysik A (1986) Mechanical properties and dimensional stability of acetylated aspen flakeboard. *Holz Roh Werkst* 44(12):453–457
- Zahri S, Belloncle C, Charrier F, Pardon P, Quideau S, Charrier B (2007) UV light impact on ellagitan-nins and wood surface colour of european oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*). *Applied Surface Science* 253(11):4985–4989
- Zimmer B, Bächle H, Schnabel T (2008) Quality control of heat treated timber: Classification of thermally treated solid wood samples by color measurement and near infrared spectroscopy (NIRS): 62nd International Convention of the Forest Products Society, 22.–24.06.2008, FPS, St. Louis, USA

Zimmer B, Hölzl F, Bongers F, Nüske J, Winkler J (2003) Erprobung eines Acetylierungsverfahrens für heimische Holzarten und Holzprodukte

Zimmer B, Schnabel T, Hölzl F (2004) Oberflächenbeschichtung acetylierter Hölzer. Modifizierte Holzoberflächen. Holz Bildung Forschung 56(1):12–14

Zimmer B, Treusch O, Schnabel T (2005) Bewertung verschiedener Modifikationsverfahren zur Verbesserung der Eigenschaften von Buchenholz. Kuchl. nicht veröffentlicht

Verwendete Normen

DIN 52 182 (1976) Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte

DIN 51 183 (1977) Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes

DIN CEN/TC 15679 (2008) Thermisch modifiziertes Holz - Definition und Eigenschaften

DIN EN 927-3 (1998) Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich. Teil 3: Freibewitterung

DIN EN 927-3 (2007) Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich. Teil 3: Freibewitterung

DIN EN 927-6 (2006) Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich. Teil 6: Künstliche Bewitterung von Holzbeschichtungen mit fluoreszierenden UV-Lampen und Wasser

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

EN ISO 11507 (2001) Beschichtungsstoffe- Beanspruchung von Beschichtungen durch künstliche Bewitterung - Beanspruchung durch fluoreszierende UV-Strahlung und Wasser

ÖNORM EN ISO 4628-4 (2004) Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen. Teil 4: Bewertung des Rissgrades

ÖNORM EN ISO 3668 (2001) Beschichtungsstoffe - Visueller Vergleich der Farbe von Beschichtungen (Farbabmusterung)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Fokus der Arbeit auf die Anwendungen von Holz im Innenbereich (etwa Fußböden) und Außenbereich (z.B. Fassadenanwendungen)	1
1.2	Farbunterschiede bei unbehandelten und wärmebehandelten Buchenbohlen	3
1.3	Verwitterte Holzfassaden im Außenbereich ©Kaufmann	6
1.4	Vergleich von Farbänderungen bei geöltem Eschenfussboden	7
2.1	Schematische Darstellung des Zellwandaufbaus (Fengel und Wegener 2003) ML: Mittellamelle, P: Primärwand, S1: Sekundärwand 1, S2: Sekundärwand 2, T: Tertiärwand, W: Warzenschicht	17
2.2	Überblick der möglichen Ein- und Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf das Holz in seiner Verwendung in Produkten über die Zeit	22
2.3	Phenoxy- und Ketyl-Radikalbildung durch angeregte Carbonylgruppe nach Li und Ragauskas (2000)	28
2.4	Reaktionsmechanismus zur Bildung von ortho- oder para-Chinon bei Belichtung phenolischer Lignineinheiten nach Kringstad und Lin (1970)	29
2.5	Schematische Darstellung der Farbmessmethode	41
2.6	Darstellung der Farbwahrnehmung an Holzoberflächen (Pöckl 2007)	42
3.1	Schematische Darstellung der Probenausformung aus den Kernbohlen (t1) behandelte Probe und (r1) Referenzprobe	50
3.2	Standortumgebung und Probenanordnung auf den Freibewitterungsständen in Kuchl (links) und im Nationalpark Berchtesgaden (rechts)	53
3.3	Darstellung der unterschiedlichen Versuchsanordnung der Proben in der Freibewitterung, links: quer zur Falllinie und rechts: parallel der Falllinie	54
3.4	Darstellung ausgewählter Klimadaten an den drei Standorten a: Kuchl, b: Berchtesgaden, c: Homestead	55

3.5	Lichtartenvergleich der verwendeten UV-Fluoreszenzlampen nach EN ISO 11507 (2001). Die spektrale Bestrahlungsstärke zwischen 290 und 400 nm ist als 100 % definiert	56
3.6	Schematische Darstellung des CIE-L*a*b* Farbsystems	60
3.7	Messvorrichtung für die Farbmessung mit Messgerät (links), Detail der Messblende (Pfeil) und der Versuchsanordnung (rechts)	62
3.8	Erklärung der eingesetzten Box-plot Darstellung	64
4.1	Häufigkeiten und Normalverteilungskurve der Farbparameterdifferenzen beider Durchmesser von 2,5 und 11 mm von radialer und tangentialer Oberfläche von Buchenholz	69
4.2	Häufigkeiten und Normalverteilungskurve der Farbparameterdifferenzen beider Durchmesser von 2,5 und 11 mm von radialer und tangentialer Oberfläche von Eschenholz	70
4.3	Mögliche Oberflächen und Jahrringbreiten auf einer Brettoberfläche	71
4.4	Visueller Vergleich von radialer und tangentialer Oberfläche von Buche und Esche . .	72
4.5	Darstellung der L*-Farbwerte mit 11 mm Messfleckgröße für die verwendeten Eschenproben, aufgeteilt nach Schnittrichtung und Jahrringbreite	73
4.6	Darstellung der L*-Farbwerte mit 11 mm Messfleckgröße für die verwendeten Buchenproben, aufgeteilt nach Schnittrichtung und Jahrringbreite	74
4.7	Einfluss der unterschiedlichen Oberflächenausrichtungen auf die Farbmessung	75
4.8	Farbänderungen von Buchenholz (links) und Eschenholz (rechts) bei unterschiedlichen Behandlungsintensitäten	78
4.9	Einfluss der thermischen Modifikation auf die L*, a* und b* Farbwerte für Buche (links) und Esche (rechts)	79
4.10	Einfluss der thermischen Modifikation (leichte Behandlungsstufe) auf die L* und b* Farbwerte für Esche. Die zwei falsch klassifizierten Proben sind durch Kreise markiert.	81
4.11	Schematische Darstellung einer möglichen Methode für den Vergütungsprozess in Echtzeit. Ein Messsystem verarbeitet die gemessenen Farbwerten (L*, a*, b* im Messbereich m1, m2, m3) in unterschiedlichen Zeitperioden (t1, t2, t3) und vergleicht die Holzfarbe im Prozess mit den zu erreichenden Farbwerten (nach Schnabel et al. 2007)	82
4.12	Farbwerte L*, a* und b* von Fichten- und Tannenholz	83
4.13	Farbwerte L*, a* und b* von Fichten- und Tannenholz	84
4.14	Farbwerte L*, a* und b* von Lärchen- und Douglasienholz	85

4.15 Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Douglasienprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten	87
4.16 Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Eichenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten	88
4.17 Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Fichtenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten	89
4.18 Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Lärchenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten	90
4.19 Darstellung der visuellen und zahlenmäßigen Farbänderungen einer Tannenprobe während der natürlichen Bewitterung, 1. Zeile enthält die Zeitangabe, 2. Zeile enthält die Farbwerte der einzelnen Abschnitte, 3. Zeile enthält die Farbdifferenzen von zwei benachbarten Abschnitten	91
4.20 Farbveränderungen einer thermisch modifizierten Edelkastanieprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	95
4.21 Farbveränderungen einer leichten thermisch modifizierten Eschenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	96
4.22 Farbveränderungen einer stark thermisch modifizierten Eschenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	97

4.23 Farbveränderungen einer Eichenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	98
4.24 Farbveränderungen einer Fichtenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	99
4.25 Farbveränderungen einer Lärchenprobe während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und b*-Werte	100
4.26 Farbveränderungen einer Tannenproben während einjähriger Sonnenbestrahlung hinter einem 2-scheibigen Fenstersystem; a: Bild vor der Auslegung, b: nach dem Prüfen, c: Mittelwerte der Remissionsgrade, d: L*-Werte, e: a*- und f: b*-Werte	101
4.27 Einfluss der unterschiedlichen Filterung der Sonnenbestrahlung durch Fensterverglasung auf die L*, a* und b* Werte für a-c: thermisch behandelte Edelkastanie, d-f: Eiche und g-i: Fichte	102
4.28 Transmissionsgrad hinter 3 mm starkem Fensterglas nach EN ISO 11341 (1997)	104
4.29 Einfluss der unterschiedlichen Filterung der künstlichen UV-Strahlung auf die L*-, a*- und b*-Werte für Tanne hinter a-c: 3 mm Floatglas d-g: 6 mm Floatglas	105
4.30 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von Tannenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	106
4.31 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von Fichtenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	107
4.32 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von Lärchenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	107
4.33 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von Eichenholz bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	108
4.34 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von thermisch modifizierter Edelkastanie bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	108
4.35 Vergleich der L*-, a*- und b*-Werte von thermisch modifizierter Esche bei unterschiedlichen Bestrahlungsarten	109
4.36 Einfluss der unterschiedlichen Umweltsimulationsarten auf die L*-, a*- und b*-Werte von Eichenholz	112

4.37 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten auf die L^* -, a^* - und b^* -Werte von a-c: Fichte und d-f: Tanne	113
4.38 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten auf L^* -, a^* - und b^* -Werte von a-c: Douglasie und d-f: Lärche	116
4.39 Mikroskopische Aufnahmen von Douglasienholz im Zeitraffer der Bewitterung, Pfeil markiert einen Riss	119
4.40 Mikroskopische Aufnahmen von Eichenholz im Zeitraffer der Bewitterung	120
4.41 Mikroskopische Aufnahmen von Fichtenholz im Zeitraffer der Bewitterung, Pfeil markiert einen Riss	121
4.42 Mikroskopische Aufnahmen der schwarzen Verfärbungen an der Holzoberfläche, einem Befall von verfärbenden Pilzen; links: punktueller Befall, mitte: Befall einer Holzfaser, rechts: Ansiedelung der Pilze an einer Insektenfraßstelle	121
4.43 Mikroskopische Aufnahme von Lärchenholz im Zeitraffer der Bewitterung	122
4.44 Mikroskopische Aufnahme von Tannenholz im Zeitraffer der Bewitterung	123
4.45 Makroskopische Aufnahmen des Faserabtrags an Eichenproben	124
4.46 Aufnahme einer Fichtenoberfläche mit den Frasstellen, Pilzbefall und Ablagerungen (links), und Wespe bei Frasstätigkeit (rechts)	124
4.47 Auswirkungen der Witterungseinflüsse an den Bewitterungsstandorten a: Kuchl, b: Nationalpark Berchtesgaden, c: Homestead auf die Rissbildung der Holzarten nach 2-jähriger Bewitterungszeit	127
4.48 Farbverschiebungen der L^* -, a^* - und b^* -Werte für die einzelnen Holzarten über eine Bewitterungszeit von 2 Jahren am Standort Kuchl	130
4.49 Messdaten der L^* -, a^* - und b^* -Werte der Lärche vom Bewitterungsstandort Kuchl mit den geglätteten Kurven mit unterschiedlichen Glättungsfaktoren a-c: 0,3, d-f: 0,5 und g-i: 0,7	131
4.50 Absolute Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen den gemessenen und geglätteten Farbparametern mit Glättungsfaktor 0,3	132
4.51 Mittelwerte und die obere und untere Grenzen der 99%-Konfidenzintervalle der Lärchenproben	132
4.52 Mittelwerte der gemessenen Farbdaten mit den oberen und unteren Grenzen der 99%-Konfidenzintervalle der Lärchenprobe	133
4.53 Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Eichenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)	135

4.54	Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Douglasien- und Lärchenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)	136
4.55	Berechnete 99%-Konfidenzintervalle aus gemessenen Mittelwerten der Fichten- und Tannenproben während einer Bewitterung am Standort Kuchl (Versuchsreihe 1)	137
4.56	Tannenprobe mit oberflächlichem Abtrocknungsprozess, wobei ein Streifen noch feucht ist und als dunkler Streifen wahrgenommen wird	137
4.57	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Douglasieproben	138
4.58	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Eichenproben	139
4.59	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Fichtenproben	139
4.60	Aufnahme der unregelmäßigen Verfärbungen an Fichtenoberflächen nach 6-monatiger Bewitterungszeit	140
4.61	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Lärchenproben	140
4.62	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Tannenproben	141
4.63	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Tannenproben	142
4.64	Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbverschiebungen bei unterschiedlichen Auslegungszeitpunkten an Fichtenproben	143
4.65	Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Eichenoberflächen	144
4.66	Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Douglasie, d-f: Lärche	145
4.67	Einfluss der Simulationsbedingungen auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Fichte, d-f: Tanne	146
4.68	Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Eichenoberflächen	147
4.69	Visuelle Betrachtung der bewitterten Eichenoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer	147

4.70 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Douglasie, d-f: Lärche	148
4.71 Visuelle Betrachtung der bewitterten Holzoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer, links: Douglasie, rechts: Lärche	149
4.72 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsarten (verkürzte Wassersprühzeiten und niedrige Bestrahlungsstärke) auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Holzoberflächen a-c: Fichte, d-f: Tanne	150
4.73 Visuelle Betrachtung der bewitterten Holzoberflächen nach 1661 Stunden Prüfdauer , links: Fichte, rechts: Tanne	151
4.74 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsart auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Eichenoberflächen	152
4.75 Einfluss der unterschiedlichen Simulationsart auf die L [*] -, a [*] - und b [*] -Farbwerte an Fichtenoberflächen	152
4.76 Vergleich der 99%-Konfidenzintervalle der Farbwerte bei natürlichen und künstlich bewitterten Eichenproben, * Zeiteinheit der Umweltsimulation	153
4.77 Einfluss der Umweltsimulation auf die farblichen Veränderungen an der Oberfläche bei thermisch modifizierter Buche	155
4.78 Einfluss der Umweltsimulation auf die farblichen Veränderung an der Oberfläche bei thermisch modifizierter Esche	155
4.79 Visueller Eindruck der farblichen Veränderungen an thermisch modifizierten Buchen- und Eschenholz nach 1661 Stunden Simulationsdauer a: unbehandelt, b: leichte Behandlungsintensität, c: mittlere Behandlungsintensität, d: starke Behandlungsintensität	156
4.80 Schematische Darstellung der Visualisierung der Farbveränderungen einer bei natürlich bewitterten Lärchenoberfläche, oben: experimentell erhobene Daten mit Modellierungskurve, unten: Verlauf der Farbänderungen während der Bewitterungsdauer, geschätzte Farbkennwerte dienten als Grundlage der erzeugten Bilder	159
4.81 Detail einer einjährigen bewitterten Lärchenprobe am Standort Kuchl	160
4.82 Detail einer computerunterstützten Bilderzeugung einer Fassadenschalung aus Douglasie und Lärche zu Beginn der Montage und nach einem Jahr Nutzungsdauer . . .	161

A.1 Einfluss der unterschiedlichen Filterung der Sonnenbestrahlung durch Fensterverglasung auf die L^* , a^* und b^* Werte für a-c: thermisch behandelte Esche (leicht), d-f: thermisch behandelte Esche (stark), g-i: Lärche und j-l: Tanne 204

Tabellenverzeichnis

2.1	Vorkommen und Bedeutung der untersuchten Baumarten in Deutschland und Österreich (Prem 2004, Polley et al. 2005)	11
2.2	Kenndaten zur Fasermorphologie der verwendeten Holzarten (Wagenführ 2000) . . .	14
2.3	Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Holzarten im Vergleich (Fengel und Grosser 1975, Wagenführ 2000)	18
2.4	Funktionelle Gruppen im Lignin [Anzahl pro 100 Phenyl-Einheiten] (Sjöström 1993)	19
2.5	Physikalische und mechanisch-technologische Kennwerte der verwendeten Holzarten (Grosser und Zimmer 2000)	20
3.1	Anzahl der verwendeten Bohlen und Proben bei unterschiedlichen Behandlungsstufen	50
3.2	Anzahl der verwendeten unbehandelten Bohlen, Proben und deren Eigenschaften . .	51
3.3	Anzahl der verwendeten Bohlen und Proben sowie die Behandlungsstufen	52
3.4	Beschreibung der Umweltsimulationsprozesse	57
3.5	Beschreibung der Zyklen der Umweltsimulation (Versuche 4-6)	58
3.6	Beschreibung der Zyklen der Umweltsimulation (Versuch 7)	58
3.7	Rissbeurteilung der bewitterten Proben	59
4.1	Einfluss der Oberfläche (radial/tangential) und Jahrringbreite auf die Farbmessung .	75
4.2	Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Buchen- und Eschenproben (Schnabel et al. 2007)	80
4.3	Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Fichten- und Tannenproben . .	84
4.4	Verteilung der Cluster und die Clusterzentren für die Lärchen- und Douglasienholzproben	86
4.5	Vergleich der Wahrnehmung der gemessenen Farbwerte und der visuellen Beurteilung	93
4.6	Bewertung der Rissbildung während natürlicher Bewitterung	125

4.7	Ergebnis der statistischen Analyse der Farbveränderungen an Holzoberflächen nach einjähriger Bewitterungsdauer an den Standorten (1) Kuchl, (2) Berchtesgaden, (3) Homestead	129
4.8	Errechnete ASF Werte zwischen natürlicher und künstlicher Bewitterung	154

Formelverzeichnis

3.1 Farbabstand	61
---------------------------	----

A Anhang

A.1 Abkürzungsverzeichnis

ASE	Antishrinkage Efficiency
ASF	Acceleration Shift Factor
CAD	Computer Aided Design
DMDHEU	Dimethyloldihydroxyethylenharnstoff
DRIFT	Diffuse-Reflektion-Infrarot-Fourier-Transformation
DTA	Differential-Thermo-Analyse
ESR	Elektronen-Spin-Resonanz
FEA	Finite-Elemente-Analysen
GLM	Generalisierte Lineare Modelle
IR	Infrarot
Loess	Locally Weighted Regression
NIR-IR	Nahes Infrarot
NMR	Nuclear-Magnetic-Resonance
MID-IR	Mittleres Infrarot
rel.	Relativ
UV	Ultraviolett
VIS	Sichtbar

A.2 Abbildungen

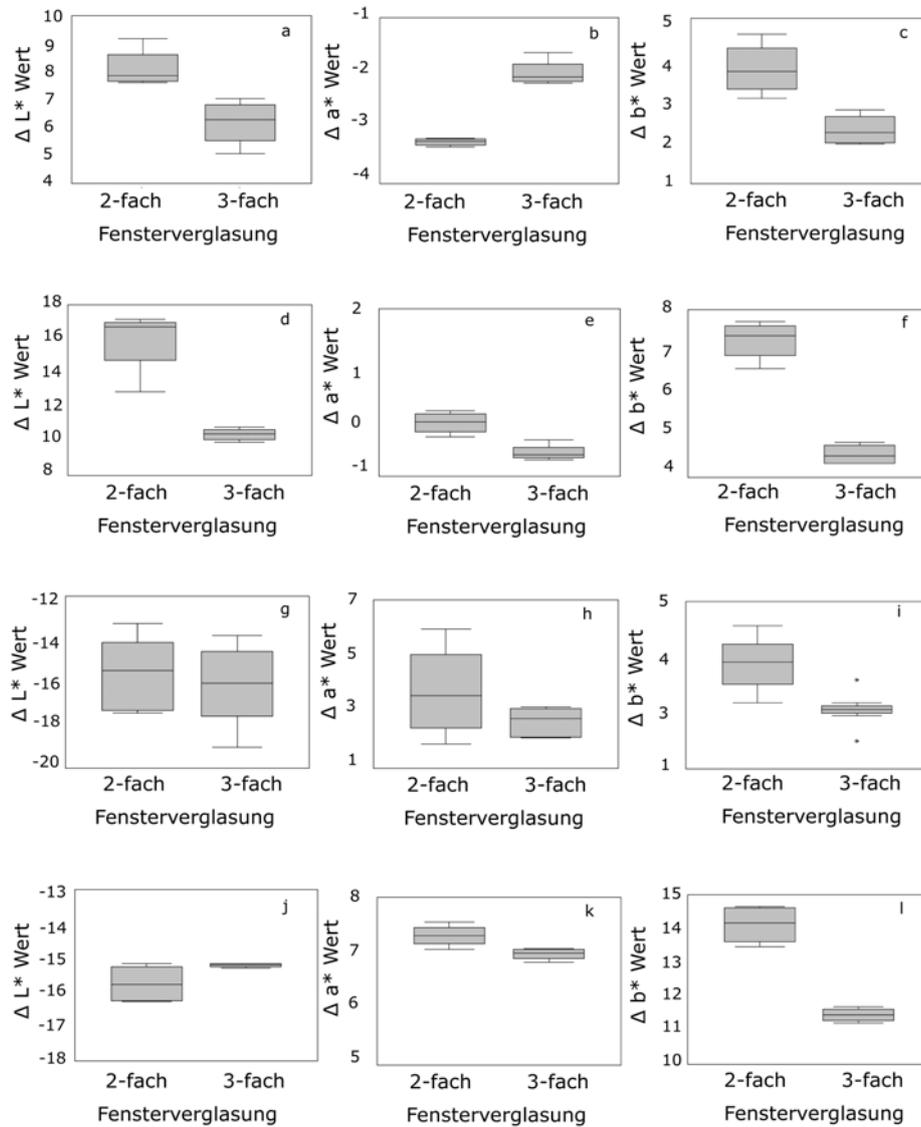


Abbildung A.1: Einfluss der unterschiedlichen Filterung der Sonnenbestrahlung durch Fensterverglasung auf die L*, a* und b* Werte für a-c: thermisch behandelte Esche (leicht), d-f: thermisch behandelte Esche (stark), g-i: Lärche und j-l: Tanne

A.3 Vorträge und Veröffentlichungen

Vorträge

Zimmer B, Bächle H, Schnabel T (2008) Quality control of heat treated timber: Classification of thermally treated solid wood samples by color measurement and near infrared spectroscopy (NIRS). Forest Products Society 62nd International Convention. 22.-24.06.2008 in St. Louis, Missouri, USA

Schnabel T (2008) Holzoberflächen-Klassifizierung und Modellbildung von Eigenschaften ausgewählter Holzarten. Forschung im Dialog. Studiengang Holztechnik und Holzwirtschaft an der Fachhochschule Salzburg. 18.06.2008

Veröffentlichungen

Schnabel T, Bächle H, Zimmer B (2007) Artificial weathering of wooden surfaces evaluated by colour measurement and near infrared spectroscopy. In: Natural and artificial ageing of polymers. Reichert T (ed) 3rd European Weathering Symposium pp:369-378

Schnabel T, Zimmer B, Petutschnigg AJ, Schönberger S (2007) An approach to classify thermally modified hardwoods by color. Forest Prod J 57(9):105-110

Schnabel T, Zimmer B, Petutschnigg AJ (2009) On the modelling of colour changes of wood surfaces. Eur J Wood Prod (online 29. 01. 2009)

Schnabel T, Zimmer B, Bächle H, Petutschnigg AJ (2009) On the modelling of colour change of thermally treated hardwoods during artificial weathering. Proceedings of the European Conference on Wood Modification 2009, angenommen

A.4 Lebenslauf

Persönliche Daten

Thomas Schnabel
Göstling Nr. 192
3345 Göstling an der Ybbs
Tel.: 0043 (0)50/ 22 11 24 03
E-Mail: thomas.schnabel@fh-salzburg.ac.at
Geb. April 1973 in Hollenstein an der Ybbs
Verheiratet

Schulbildung und Weiterbildung

09/1979–07/1983 Volksschule
09/1983–07/1987 Hauptschule
09/1987–06/1988 Polytechnischer Lehrgang

04/1989–06/1989 Berufsschule für Forstfacharbeiter
06/1990–08/1990 Berufsschule für Forstfacharbeiter
09/1991–11/1991 Berufsschule für Forstfacharbeiter

03/1992–03/1994 Kurse für die Forstwirtschaftsmeisterprüfung
12/1996–06/1999 Prüfungen für Studienberechtigung

Studium

09/1999–06/2003 Studium Holztechnik und Holzwirtschaft an der Fachhochschule Salzburg

Diplomarbeit mit dem Thema *Untersuchungen zu Beschichtungssystemen auf acetylierten Holzoberflächen*

Berufserfahrung

07/1988–08/1991 Forstfacharbeiterlehrling, Österreichische Bundesforste AG, Standort Waidhofen

09/1991–08/1999 Forstfacharbeiter, Österreichische Bundesforste AG, Standort Waidhofen

seit 11/2003 Wissenschaftlicher Angestellter am Studiengang Holztechnik und Holzwirtschaft an der Fachhochschule Salzburg