

Abschlussbericht:

Rotkerniges Buchenholz – Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten

Evelyn Pöhler, Raoul Klingner, Tina Künniger

EMPA Dübendorf, März 2004

ABSCHLUSSBERICHT BUCHENROTKERN: RAHMENBEDINGUNGEN	4
1 ZUSAMMENFASSUNG	5
2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER STUDIE	8
2.1 EINFÜHRUNG	9
2.1.1 URSACHEN DER ROTKERNBILDUNG	9
2.2 LITERATURWERTE DER TECHNOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN VON ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ	12
2.3 WIRTSCHAFTLICHE RELEVANZ DER VERFÄRBUNG VON BUCHENHOLZ	14
2.4 PROBENMATERIAL	15
3 PRÜFUNG DER FARBBESTÄNDIGKEIT VON ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ	17
3.1 METHODIK DER FARBMESSUNG	17
3.2 MATERIAL	19
3.2.1 PROBENNAHME	19
3.2.2 ANSTRICHSTOFFE	20
3.3 BESTRAHLUNG	21
3.4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	23
3.4.1 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG DER UNBEHANDELTEN PROBENKOLLEKTIVE	23
3.4.2 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG NACH DER OBERFLÄCHENBEHANDLUNG	25
3.4.2.1 Visuelle Beurteilung	26
3.4.2.2 Farbmessung 1.Serie: Konventionelle Oberflächenbehandlungssysteme	27
3.4.2.3 Farbmessung 2. Serie: Neuere Oberflächenbehandlungssysteme	31
4 PHYSIKALISCHE UND MECHANISCH-TECHNOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ	35
4.1 ELASTOMECHANIK	35
4.1.1 METHODE	35
4.1.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	35
4.2 BRINELL-HÄRTE	40
4.2.1 MATERIAL UND METHODE	40
4.2.2 ERGEBNISSE	40
4.2.3 DISKUSSION	42
4.3 QUELLUNG UND SCHWINDUNG	43
4.3.1 METHODE	43
4.3.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	43
5 VERKLEBUNGSVERHALTEN VON ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ	47
5.1 FRAGESTELLUNG	47
5.2 MATERIAL UND METHODEN	47

5.3	ERGEBNISSE	49
5.3.1	PVAC	50
5.3.2	PUR	51
5.3.3	MUF	53
5.4	DISKUSSION	55
5.4.1	EINFLUSS DER KLEBSTOFFSYSTEME AUF DIE LÄNGSZUGSCHERFESTIGKEIT	55
5.4.2	EINFLUSS DES ROTKERNS AUF DIE LÄNGSZUGSCHERFESTIGKEIT	59
6	<u>UMFRAGE ZUM VORKOMMEN VON ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ IN DER SCHWEIZ</u>	<u>61</u>
6.1	ABSICHT / EINLEITUNG	61
6.2	UMFRAGE	62
6.2.1	VORKOMMEN ROTKERN	62
6.2.2	PREISE VON NICHT ROTKERNIGEM IM VERGLEICH ZU ROTKERNIGEM BUCHENHOLZ	64
6.3	DISKUSSION	66
7	<u>AUSBLICK</u>	<u>67</u>
8	<u>LITERATUR</u>	<u>69</u>
9	<u>ANHANG:</u>	<u>71</u>
9.1	ANHANG 1: TAFELN OBERFLÄCHENBEHANDLUNG 1. SERIE UND 2. SERIE	71
9.2	ANHANG 2: UMFRAGE SOMMER 2002	85

Abschlussbericht Buchenrotkern: Rahmenbedingungen

Rahmenbedingungen

Das Projekt „Rotkerniges Buchenholz – Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten“ wurde vom Fonds zur Wald- und Holzforschung finanziell unterstützt (Projektnummer 2002.17) und während des Zeitraumes vom Februar 2003 bis Januar 2004 an der Abteilung Holz der EMPA bearbeitet.

Zusammenstellung der durchgeführten Arbeiten

Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten sind durchgeführt worden:

- Prüfung der Farbbeständigkeit von rotkernigem Buchenholz
- Physikalische und mechanisch-technologische Eigenschaften
 - Elastomechanik
 - Härte
 - Quellung und Schwindung
- Verklebungsverhalten von rotkernigem Buchenholz
- Umfrage zum Vorkommen von rotkernigem Buchenholz in der Schweiz

Beteiligte Personen

Personen	Arbeiten
Fischer Anja	Mikroskopische Aufnahmen, Farbbeständigkeit
Heer Daniel	Probenzuschnitt
Klingner Raoul	Farbbeständigkeit, Elastomechanik, Quellung und Schwindung
Künniger Tina	Farbbeständigkeit, Umfrage
Nüssli Nina	Elastomechanik, Rohdichte
Pöhler Evelyn	Farbbeständigkeit, Umfrage, Verklebungsverhalten, Härte
Richter Klaus	Beratung
Risi Walther	Quellung und Schwindung
Weiss Kurt	Elastomechanik, Verklebungsverhalten

1 Zusammenfassung

Die Buche hat heute im Mittelland einen Anteil von 24% an der gesamten Stammzahl und ist in der kollinen bis unteren Stufe die häufigste Baumart der Schweiz. Der Holzvorrat von Buche in der Schweiz beträgt etwa 59.2 Mio m³, wovon jährlich im Durchschnitt 1.15 Mio m³ geerntet werden ^[1]. Beim geernteten Buchenstammholz, vor allem bei älteren Bäumen mit grossen Stammdurchmessern, wird sehr oft Rotkern (auch ‚Farbkern‘) festgestellt. Der potentielle Wert des als fehlerhaft oder minderwertig deklarierten rotkernigen Buchenholzes wird massiv herabgesetzt und stellt damit neben den Wachstumsspannungen das grösste wirtschaftliche Problem bei der Vermarktung des Buchenstammholzes dar.

Angesichts der grossen Mengen des auch in Zukunft jährlich anfallenden rotkernigen Buchenholzes erscheint daher für eine höhere Wertschöpfung neben dem Einsatz in der Möbel- und Parkettherstellung besonders eine Massenanwendung wie z.B. in Brettschichtholz als erstrebenswert. Übergeordnetes Ziel der Studie ist daher die Bereitstellung der wissenschaftlichen Grundlagen für einen vermehrten Einsatz. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den dafür relevanten technologischen Eigenschaften sowie dem Verklebungsverhalten des rotkernigen Buchenholzes und dessen Vergleichbarkeit mit normalem Buchenholz ohne Rotkern. Darüber hinaus sollen verschiedene Lacksysteme hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Farbverhalten von rotkernigem Buchenholz im Sichtbereich untersucht werden. Um in Zukunft rotkerniges Buchenholz dauerhaft als Alternative in Bereichen der Massenanwendung etablieren zu können, bedarf es einer zuverlässigen und kontinuierlichen Bereitstellung seitens der Forste. Da es in der Schweiz keine offizielle Statistik über das tatsächliche Aufkommen von rotkernigem Buchenholz gibt, soll im Rahmen dieser Studie durch eine Umfrage versucht werden, detaillierte Kenntnisse über das kantonale Aufkommen der Ressource und somit Planbarkeit im Sinne eines kontinuierlichen Absatzes in Massenanwendungen zu erlangen.

Der Unterschied der Farbwirkung der untersuchten Probenkollektive mit und ohne Rotkern im unbehandelten Ausgangszustand war in den Mittelwerten der Buntheit C* [3] sowie der Helligkeit L* beider Probenserien höchst signifikant. Das **Farbverhalten** während der Xenon-Bestrahlung der behandelten Oberflächen von Buche mit und ohne Rotkern ist zwar unterschiedlich, kann im Vergleich für das rotkernige Kollektiv jedoch nicht als nachteilig für dessen Verwendung angesehen werden. Proben ohne Rotkern dunkelten während der Bestrahlung nach, Proben mit Rotkern dagegen verlieren etwas an Farbprägnanz. So nähern sich die Farbwirkungen der Proben im Laufe der Bestrahlung an. Erwartungsgemäss durchlaufen die unbehandelten Proben die grösste gesamthafte Änderung ihrer Farbwirkung, jedoch spielt sich diese weniger in einer Änderung der Helligkeit als in einer Veränderung der Buntheit ab. Der Einsatz

von UV-Absorbern und Radikalfängern in neuartigen Oberflächenbehandlungen verbessert das Farbverhalten beider Probenkollektive im Vergleich zu gängigen Oberflächenbehandlungen nur teilweise. Die Wahl des Lackes scheint einen ebenso grossen Einfluss auf das Farbverhalten zu haben wie die speziellen Additive.

Bei der Untersuchung der **physikalischen und mechanisch-technologischen Eigenschaften** der untersuchten Probenkollektive mit und ohne Rotkern zeigt sich kein Unterschied zum Nachteil des Probenkollektives mit Rotkern. Deren Eigenschaften können generell als vergleichbar angesehen werden. Die untersuchten Probenkollektive mit Rotkern hatten zum Teil eine erhöhte Rohdichte und folglich auch in der Gesamtheit auch signifikant höhere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Die erhöhte Rohdichte des rotkernigen Probenkollektives hatte auch eine höhere Brinell-Härte der rotkernigen Buche zu Folge. Die Buchenproben mit Rotkern wiesen ausserdem eine niedrigere Quellungsanisotropie auf.

Bei der rotkernigen Buche stellte sich die Frage, ob die den Rotkern verursachenden phenolischen Inhaltsstoffe die **Verklebung** negativ beeinflussen könnten. Für die Untersuchungen der Längszugscherfestigkeiten der Probenkollektive Buchenholz ohne Rotkern und mit Rotkern wurden drei verschiedene Klebstoffsysteme eingesetzt (PVAC, PUR, MUF) und geprüft. Es wurden 2 verschiedene Lagerungstypen gewählt, um die Verklebungsqualität bei einfachen und verschärften Prüfbedingungen zu testen. Die Ergebnisse der Untersuchungen nach der verschärften Prüfbedingung (A4-Lagerung) zeigen, dass gerade die mit PVAC und PUR behandelten rotkernigen Proben signifikant höhere Zugscherfestigkeiten aufweisen als die nicht rotkernigen Proben. Bei den mit MUF behandelten Proben ist der Unterschied der Festigkeiten bei den Proben mit Rotkern auch höher, jedoch nicht signifikant. Vergleicht man die Längszugscherfestigkeiten von Proben mit Rotkern und ohne Rotkern nach der einfachen Prüfbedingung (A1-Lagerung), so zeigen die Proben mit Rotkern bei der Klebstoffvariante MUF signifikant höhere Werte. Diese erhöhten Festigkeiten könnten auf die im Mittel höhere Rohdichte des rotkernigen Holzes zurückzuführen sein, da fast ausschliesslich Holzbruch vorlag. Bei PUR sind die Werte von rotkernigen und nicht rotkernigen Proben vergleichbar, erklärbar durch den Bruch in der Klebstofffuge. Werden alle Ergebnisse zum Vergleich der Festigkeiten der Klebstofffugen von Buchenholz ohne und mit Rotkern zusammengefasst, so ist das rotkernige Holz dem nicht rotkernigen ebenbürtig. Betrachtet man die Zugscherfestigkeiten der beiden Varianten, so zeigt die rotkernige Buche sogar z.T. signifikant höhere Festigkeiten.

Für eine Massenverwendung von Buche mit Rotkern für die industrielle Verarbeitung ist eine kontinuierliche und zuverlässige Bereitstellung dieses Holzes erforderlich. Dafür sind Daten über das Aufkommen rotkerniger Buche notwendig. In der Schweiz gibt es jedoch keine offiziell-

le Statistik über rotkerniges Buchenholz. Aufgrund dessen wurde eine **Umfrage** zu diesem Thema durchgeführt. Da der Aufwand für eine gesamtschweizerische Umfrage innerhalb dieses Projektes zu gross gewesen wäre, sollte eine stichprobenmässige Umfrage bei den Kantonsforstämtern orientierende Zahlen liefern. Der Umfragebogen sowie ein kurzer Projektbeschrieb wurde über die Kantonsoberförster an die jeweiligen Betriebsleiter, Förster oder Kreisförster weitergeleitet. Bei der Auswertung der über die Umfrage erhaltenen Zahlen zum Buchenstammholz zeigt sich, dass der prozentuale Rotkernanteil in den einzelnen Kantonen zwischen 30 und 80 % schwankt. Der durchschnittliche Anteil Rotkern beträgt 40%. Beim Industrieholz ist zwischen ca. 20 und 80% und beim Brennholz 20-80% rotkernig. Die Kantone Nidwalden und Obwalden melden den höchsten durchschnittlichen Rotkernanteil im Buchenstammholz mit 80%. Die Kantone Aargau und Waadt haben den geringsten Rotkernanteil mit ca. 30 %. Die Auswirkungen des Sturmes Lothar zeigten Einfluss auf die erhaltenen Mengen des Einschlaages, nicht jedoch auf den Anteil Rotkern.

Beim Vergleich der Angaben zu den Buchenholzpreisen ist ersichtlich, dass die grössten preislichen Unterschiede hinsichtlich Rotkern beim Stammholz zu verzeichnen sind, der Rotkern bei Industrie- und Brennholz jedoch kaum einen preislichen Unterschied bewirkt. Der mittlere Preis für nicht rotkerniges Stammholz beträgt 140 sFr./m³, er variiert jedoch zwischen 45 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Waadt) bis zu 250 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Basel Land/Basel Stadt). Verglichen mit den Rundholzrichtpreisen der Holzindustrie Schweiz liegen diese Angaben innerhalb der erwarteten Preise der Qualitäten A, B und C. Stammholz mit Rotkern erreicht Werte zwischen 35 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Waadt) bis 180 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Aargau), der mittlere Preis beträgt 76 sFr./m³. Hier zeigt sich der Rotkern doch stark als qualitätsminderndes Merkmal, erreicht man bei Stammholz mit Rotkern kaum mehr die Qualität B.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung der Studie

Die von Natur aus konkurrenzstarke Buche hat heute im Mittelland einen Anteil von 24% an der gesamten Stammzahl, und ist in der kollinen bis unteren montanen Stufe die häufigste Baumart der Schweiz. Den höchsten Buchenanteil weist der östliche Jura auf; ausgedehnte reine Buchenwälder finden sich vor allem im Gebiet um Liestal/Dornach und stellenweise im Tessin. Der Holzvorrat von Buche in der Schweiz beträgt etwa 59.2 Mio m³, wovon jährlich im Durchschnitt 1.15 Mio m³ geerntet werden ^[1].

Beim geernteten Buchenstammholz, vor allem bei älteren Bäumen mit grossen Stammdurchmessern, wird sehr oft Rotkern (auch ‚Farbkern‘) festgestellt. Der potentielle Wert des als fehlerhaft oder minderwertig deklarierten rotkernigen Buchenholzes wird massiv herabgesetzt und stellt damit neben den Wachstumsspannungen das grösste wirtschaftliche Problem bei der Vermarktung des Buchenstammholzes dar. In den Schweizerischen Handelsgebräuchen für Rundholz^[2] ist in der Qualität A der Rotkern ausgeschlossen, die Qualität B erlaubt einen Rotkernanteil von < ein Drittel des Stammdurchmessers und nur in den minderwertigen Qualitäten C und D ist Rotkern erlaubt. Erhebliche Einnahmeeinbussen in der Forstwirtschaft sind die Folge (siehe Kapitel 2.3 Wirtschaftliche Relevanz der Verfärbung von Buchenholz).

Die Ursachen und Entstehung der Farbverkernung bei Buche sind weitestgehend erforscht und somit bekannt (siehe Kapitel 2.1.1 Ursachen der Rotkernbildung). Man kann davon ausgehen, dass in Schweizer Beständen auch in Zukunft grosse Mengen rotkerniger Buche anfallen werden. Daher ist es wichtig, den Absatz und die Verwendung von Buchenrotkern zu fördern.

Die Problematik der Abwertung von rotkernigem Buchenholz ist nicht neu und hat in Deutschland und anderen europäischen Ländern mit nennenswertem Buchenbestand zu eingehender Forschungsaktivität geführt ^[3, 4]. Neben den als bekannt erachteten Ursachen der Entstehung von Rotkern und ähnlichen Verfärbungen wird oft auch die Vergleichbarkeit der technologischen Eigenschaften von rotkernigem Buchenholz mit unverfärbtem Buchenholz berichtet. Detaillierte Messergebnisse, die diese Aussagen grundsätzlich bestätigen, sind bei Molnár ^[5] zu finden. Die technologische Eigenschaften wurden aber lediglich in den derzeit relevanten Verwendungsgebieten Möbel- oder Innenausbau als vergleichbar erachtet, eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des rotkernigen Buchenholzes ist dort jedoch allenfalls bezüglich der Farbveränderung im Laufe der Benutzungszeit von besonderer Bedeutung. Grundlegend für eine erfolgreiche Anwendung von nennenswerten Mengen an rotkerniger Buche im Sichtbereich ist des Weiteren die Bereitstellung eines farblich relativ homogenen Sortiments. Bis heute ist dies für die Sägereien aber nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen.

Angeichts der grossen Mengen des auch in Zukunft jährlich anfallenden rotkernigen Buchenholzes erscheint daher für eine höhere Wertschöpfung neben dem Einsatz in der Möbel- und Parkettherstellung besonders eine Massenanwendung wie z.B. in Brettschichtholz als erstrebenswert.

Übergeordnetes Ziel der Studie ist daher die Bereitstellung der wissenschaftlichen Grundlagen für eine Massenanwendung beispielsweise in der BSH-Herstellung. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den dafür relevanten technologischen Eigenschaften sowie dem Verklebungsverhalten des rotkernigen Buchenholzes und dessen Vergleichbarkeit mit normalem Buchenholz ohne Rotkern. Besonderes Augenmerk wird dabei auch auf die Relevanz von juvenilem Holz in den rotkernigen Sortimenten gelegt. Darüber hinaus sollen verschiedene Lacksysteme hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Farbverhalten von rotkernigem Buchenholz im Sichtbereich untersucht werden.

Um in Zukunft rotkerniges Buchenholz dauerhaft als Alternative in Bereichen der Massenanwendung etablieren zu können, bedarf es einer zuverlässigen und kontinuierlichen Bereitstellung seitens der Forste. Da es in der Schweiz keine offizielle Statistik über das tatsächliche Aufkommen von rotkernigem Buchenholz gibt, sollte im Rahmen dieser Studie durch eine Umfrage versucht werden, detaillierte Kenntnisse über das kantonale Aufkommen der Ressource und somit Planbarkeit im Sinne eines kontinuierlichen Absatzes in Massenanwendungen ermöglicht werden.

2.1 Einführung

2.1.1 Ursachen der Rotkernbildung

Die Buche zählt zu den Baumarten, bei denen fakultativ eine Farbkernbildung erfolgen kann, die durch exogene Faktoren ausgelöst wird. Anders als bei obligatorischen Farbkernbildnern ist das Holz der Buche im Normalfall über den gesamten Querschnitt physiologisch aktiv, also als Splintholz zu bezeichnen.

Schon im stehenden Baum können verschiedene Verfärbungsmuster auftreten, die sich in Ausprägung und Entstehung mehr oder weniger deutlich unterscheiden. Von Sachsse^[6] wurde folgende Systematisierung vorgenommen, die aber die tatsächlichen Ausprägungen der Natur nur theoretisch voneinander trennen kann. In der Praxis lässt sich nicht jede Verfärbung eindeutig einem der nachfolgend beschriebenen Grundmuster zuordnen.

Rotkern

Elemente der Rotkernbildung sind Verfärbung und Verthyllung. Der rotbraun gefärbte Rotkern ist nicht immer mit den Jahrringen deckungsgleich begrenzt, im Querschnitt aber nahezu kreisförmig-rund, verläuft im Stammlängsschnitt spindelförmig (Abb. 2.1) und erreicht seinen maximalen Durchmesser in etwa einem Drittel bis zur Hälfte der relativen Schafthöhe. Die Verthyllung des Rotkerns ist gleichmässiger, aber weniger ausgeprägt als bei den weiteren beschriebenen Kerntypen.



Abb. 2.1: Längsschnitt und Querschnitt einer Buche mit starker Rotkernbildung im zentralen Bereich.

Lange bestand Uneinigkeit über die Ursache der Rotkernbildung bei der Buche. Einige Autoren sprachen von einem reinen Altersphänomen und folgerten, bei unverfärbten Buchen hätte der Kernbildungsprozess noch nicht eingesetzt. Heute werden einhellig exogene Faktoren als Auslöser angesehen ^[7, 8]. Die Rotkernbildung tritt vermehrt im Alter von 90-140 Jahren auf, aber auch bei jüngeren Bäumen wird Rotkern gefunden ^[9].

Allgemein anerkannt wird die erstmals von Zycha ^[10] genauer formulierte Luft-Kern-Theorie. Er stellte fest, dass die Rotkerngrenze bei älteren Buchen stets bei der 60%-Holzfeuchte-Marke liegt, der Rotkern also nur im Bereich geringerer Feuchten vorkommt. Das Eindringen von Luftsauerstoff führt zur oxidativen Braunfärbung und zur Bildung von Thyllen. Die Braunfärbung wird durch phenolische Inhaltsstoffe verursacht. Die phenolische Polymerisate werden über den Shikimatweg über Hydrolyse der Stärke und der löslichen Kohlenhydrate aufgebaut. Genauer beschrieben sind die bei Buche vorkommenden phenolischen Substanzen bei Dietrichs ^[11]. So werden bei der Verkernung insbesondere Flavonoide in kaum lösliche, braune, phlobaphenartige Produkte umgewandelt, die die Braunfärbung des Kernholzes verursachen.

Während der Rotkern somit eine normale kaum vermeidbare Erscheinungsform ist, stellen die im Folgenden beschriebenen Kernbildungen Besonderheiten dar.

Spritzkern

Wichtigste Charakteristika des Spritzkerns sind die bizarr-zackenförmige Begrenzung sowie die besonders starke Verthyllung und die Anhäufung von Kernstoffen im Randbereich. Der Spritzkern liegt häufig als Nasskern vor. Er ist im Wesentlichen ein Phänomen des Stammfusses. Mechanische Stammverletzungen in Form von Rückeschäden sind als Ursache unwahrscheinlich, weil sie eher zur Ausbildung eines Wundkernes führen. Zusammenhänge zu zentralen Wurzelverletzungen, die mit Bakterienbesiedlung einhergehen können, sind dagegen wahrscheinlicher ^[12].

Wundkern

Buche ist eine Baumart mit sehr guter Kompartimentierungsfähigkeit. Die Wundkernbildung tritt in unmittelbarer Nähe von Stamm- bzw. Kambium-Verletzungen auf und lässt sich durch das CODIT-Modell beschreiben ^[13]. Die Färbung des Holzes ist hell-rötlich-grau, die Ausdehnung in radialer Richtung auf wenige Zentimeter, in axialer Richtung meist auf ca. 25 cm begrenzt. In den Lumina der Parenchymzellen im Wundbereich sind hochmolekulare Kernstoffe eingelagert, und die Gefäße sind stark verthyllt.

Abnormer Kern

Der abnorme Kern sieht dem Spritzkern ähnlich, weist aber in den Randzonen schon kurz nach der Fällung tiefschwarze Verfärbungen auf. Er kann einem Rotkern aufgesetzt sein und schreitet vermutlich schnell fort. Die schwarzen Randzonen weisen eine extrem starke Verthyllung und hohe Gehalte an phenolischen Verbindungen auf. Verschiedene Mechanismen führen zur Bildung abnormer Kerne. Ist beispielsweise die Holzfeuchte deutlich erhöht und der nasskern-typische Geruch nach Buttersäure vorhanden, deutet dies auf Bakterien hin. Nach Schmidt und Mehringer ^[14] kann eine Alkalisierung der Kapillarflüssigkeit zur Braunfärbung führen.

Neben der fakultativen Farbkernbildung im stehenden Baum treten bei Buche auch Verfärbungen nach dem Einschlag auf. Ursprünglich differenzierte man die Verfärbungen lediglich als biotisch und abiotisch. Diese Trennung war wenig genau und konnte zudem nicht alle Verfärbungen erfassen. Bauch ^[15] untergliederte Verfärbungen nach dem Einschlag nach ursächlichen Reaktionen in fünf Gruppen:

- Mikroorganismen
- physiologische Ursachen
- biochemische Ursachen
- chemische Reaktion
- kombinierte Reaktion

Diese Reaktionen treten lagerungs- oder prozessbedingt auf.

Bei der Lagerung des Rundholzes an der Luft kommt es an den Querschnittsflächen mit der Zeit zu Einlauf, d.h. Verthyllung des Holzes und oxidativer Braunfärbung ^[16], sowie zu Verstocken, d.h. zur Besiedelung von Mikroorganismen. Beides kann durch Wasserlagerung und Berieselung mehr oder weniger sicher verhindert werden. Dennoch kommt es auch hier zu Verfärbungen. Sie sind auf die Oxidation von ausgeschwemmten Phenolen bzw. auf chemische Reaktionen in der Folge von Bakterienbesiedlung zurückzuführen.

Die prozessbedingten Verfärbungen sind solche, die bei Trocknen, Dämpfen und Kochen des Buchenholzes vorkommen. Bei allen Prozessschritten können hier Temperatur-Holzfeuchte-Verfärbungen, d.h. zur Intensivierung der Rot- und Gelbfärbung und zur Abnahme der Helligkeit führende Reaktionen des Lignins bzw. der Hemicellulosen, und Oxidation phenolischer Inhaltsstoffe ursächlich sein. Bei der Trocknung spielt vor allem die saure Hydrolyse von Hemicellulosen sowie die Oxidation phenolischer Inhaltsstoffe eine Rolle. Beim Dämpfen und Kochen werden diese Mechanismen noch durch die Bildung chromophorer Gruppen in Ligninseitenketten und Ligninkondensation überlagert ^[17, 18]. Bei allen Prozessschritten kann es zudem zu Metallkontaktverfärbungen durch die Reaktion von Gerbstoffen mit Metallsalzen kommen.

2.2 Literaturwerte der technologischen Eigenschaften von rotkernigem Buchenholz

Rotkerniges Buchenholz erregte bisher das Interesse der Forschung hauptsächlich in anatomischer und physiologischer Hinsicht. Ursache und Entstehung von Rotkern und anderen Verfärbungen bei Buche sind daher eingehend erforscht und weitgehend bekannt. Die technologischen Eigenschaften von rotkerniger Buche gelten gegenüber unverfärbter Buche als unbeeinträchtigt ^[19]. Wissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Sortimenten rotkerniger Buche sind allerdings seltener zu finden. Obwohl die Annahme unbeeinträchtigter technologischer Eigenschaften rotkerniger Buche grundsätzlich nahe liegt, erscheinen Einflüsse der Inhaltsstoffe auf das Verklebungsverhalten und erhöhte Anteile an juvenilem Holz in rotkernigen Sortimenten aufgrund dessen Marknähe und

entsprechende Auswirkungen auf technologische Eigenschaften durchaus möglich oder sogar wahrscheinlich. Dies veranlasste Molnár^[5] zu einer Untersuchung der klassischen technischen und technologischen Eigenschaftskennwerte von rotkerniger Buche in Ungarn (Tab. 2.1). Die Ergebnisse zeigen keinen signifikanten Unterschied des generellen Eigenschaftsprofils. Es finden sich Abweichungen im Schwindungsverhalten sowie bei der Druck- und Scherfestigkeit. Deutliche Abweichungen zeigen sich bei der Schlagbiegefestigkeit. Mögliche Ursachen dafür werden allerdings nicht diskutiert. Die verminderte Schlagbiegefestigkeit scheint allenfalls auf einen erhöhten Anteil an juvenilem Holz in der Fraktion rotkerniger Buche hinzudeuten.

Tab. 2.1 Physikalische Kennwerte von rotkerniger Buche nach Molnár et al.^[5]. Signifikante Unterschiede zwischen normaler und rotkerniger Buche fett gedruckt. Werte von Fichte zum Vergleich nach Wagenführ^[20].

Materialeigenschaften		Buche ohne Rotkern Durchschnitt	Buche mit Rotkern Durchschnitt	Differenz Durchschnitt [%]	Signifikanz- niveau	Fichte (<i>Picea abies</i>) Durchschnitt
Dichte	[g/cm ³]	0.712	0.723	+ 1.54	0.214	0.430
Schwindung						
tangential	[%]	12.27	11.08	- 9.70	0.000	7.9
radial	[%]	6.04	5.85	- 3.15	0.178	3.6
longitudinal	[%]	0.47	0.51	+ 8.51	0.108	0.3
volumetrisch	[%]	18.05	16.78	- 7.04	0.000	11.8
Brinell-Mörrath Härte						
axial	[MPa]	57.59	57.55	- 0.07	0.966	~32
tangential	[MPa]	25.07	27.72	+ 10.57	0.000	~12
radial	[MPa]	22.13	24.58	+ 11.07	0.000	~12
Druckfestigkeit	[MPa]	65.38	62.54	- 4.34	0.036	50
Scherfestigkeit	[MPa]	11.81	13.33	+ 12.87	0.004	6.7
Schubmodul						
nach Standard	[MPa]	120.10	115.83	- 3.56	0.164	-
Produkt Dimen- sion	[MPa]	103.62	97.73	- 5.68	0.052	-
E-Modul						
nach Standard	[MPa]	13972.8	13345.5	- 4.18	0.016	11000
Produkt Dimen- sion	[MPa]	9837.2	10249.7	+ 4.19	0.098	
Schlagbiegefes- tigkeit	[J/mm ²]	0.093	0.066	- 29.03	0.000	0.046
Taber Abrasionsbeständig- keit						
ungedämpft	[mm/100 rot.]	0.029	0.019	- 32.63	0.000	-
gedämpft	[mm/100 rot.]	0.033	0.020	- 39.65	0.000	-

Im Hinblick auf den derzeitigen Umbau der Wälder und einer damit verbundenen Ausdehnung der Laubholzproduktion muss die Forst- und Holzwirtschaft daran interessiert sein, dass die Voraussetzungen für eine vermehrte Anwendung von Laubholz auch in Massenanwendungen geschaffen werden. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verfügbarkeit von Buchenvor-

kommen wird derzeit in Deutschland die Eignung für die Verwendung von Buche in der Brett-schichtholzherstellung untersucht ^[21]. Gegenüber Fichte besitzt Buche den Vorteil höherer Stei-figkeiten und Festigkeitseigenschaften. In der BSH-Herstellung erzielt Buche in Relation zu den Rohstoffkosten 20-30% höhere elastomechanische Eigenschaften und eine geringere Streuung der Eigenschaften. Das Holz wird aber derzeit kaum für BSH eingesetzt auf Grund ausreichen-der Versorgung der Industrie mit Fichtenlamellen, vorhandener Standardisierung und Normung für das Massensortiment Fichte und stärkerer Dimensionsänderungen von Buche gegenüber Fichte. Während hochwertiges Buchenholz seinen guten Absatz in der Möbelindustrie behalten wird, sind mindere Qualitäten auf dem Markt nur schwer abzusetzen.

2.3 Wirtschaftliche Relevanz der Verfärbung von Buchenholz

Schätzungen der EMPA, basierend auf einer schriftlichen Umfrage bei allen Forstkreisämtern der Schweiz während einer Voruntersuchung zu dieser Studie (Rücklauf >70%), haben Folgen-des ergeben (Kapitel 9.3 Anhang 3: Umfrage Sommer 2002):

Durchschnittliche Jahresnutzung von Buche in der Schweiz 1.15 Mio m³/Jahr

Geschätzter Anteil Rotkern (49%) 0.56 Mio m³/Jahr

Geht man davon aus, dass dieses rotkernige Holz bisher durchschnittlich für einen Preis von 100.- CHF (entspricht Rundholzqualität C, Durchmesserklasse 4) verkauft werden kann, ent-spricht dies einem Gesamtwert von:

Verkauf Rotkerniger Buche als Qualität C 56 Mio CHF/Jahr

Bei einer verstärkten Verwendung von rotkerniger Buche für hochwertige Produkte könnte (bei entsprechender Nachfrage) durchaus ein Verkaufspreis von 180.- CHF (entspricht Rundholz-qualität B, Durchmesserklasse 4) erzielt werden. Dies entspricht einem Gesamtwert von:

Verkauf Rotkerniger Buche als Qualität B 101 Mio CHF/Jahr

Höhere Einnahmen der Schweizer Forste in Höhe von maximal 45 Mio CHF pro Jahr wären theoretisch möglich. Diese Grössenordnung scheint gesamthaft jedoch kaum erreichbar, vor allem aus Gründen einer zu geringen Nachfrage von Buche generell sowie anderen Qualitäts-mängeln des Holzes ausser Rotkern. Selbst bei einer vorsichtigen Schätzung, dass nur 30% des bisher als Qualität C verkauften rotkernigen Buchenholzes in Zukunft als Qualität B abge-

setzt werden könnte, entspräche dies immerhin Mehreinnahmen in Höhe von 4.5 Mio CHF pro Jahr. Genauere Abschätzungen sind momentan aber nicht möglich, da in den Schweizer Forstämtern keine Statistiken über rotkernige Buche geführt werden und auch keine repräsentativen Erfahrungen über Absatzmöglichkeiten am Schweizer Markt bestehen.

Es steht jedoch fest, dass das Buchenaufkommen in den Schweizer Wäldern grosses Potential besitzt, für die Forstbetriebe eine grössere Wertschöpfung zu generieren, falls eine höherwertige Verwendung für die schwer abzusetzenden rotkernigen Sortimente erschlossen werden könnte. Eine reale Chance bietet die Verwendung von Mischsortimenten in der BSH-Herstellung, wenn verlässliche technologische Kennwerte für solche Sortimente vorliegen. Ein Hauptziel dieser Studie ist es also grundlegende Daten zu liefern, um dieses brach liegende Potential besser ausschöpfen zu können.

2.4 Probenmaterial

Das Probenmaterial für alle folgenden Untersuchungen (ausser der ersten Serie der Untersuchung von Oberflächenbehandlungen) stammt von Einschlügen im Aargau (Brugg, Mülligen, Lenzburg) der Sägerei Schmidt in Wildegg. Es wurden 5 Stämme (A-E, Abb. 2.2) ausgewählt, technisch getrocknet und an der EMPA in Normalklima bis zur Verarbeitung und Prüfung gelagert. Für sämtliche Versuche hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, dem Verklebungsverhalten sowie des Oberflächenverhaltens wurden die Versuchsproben in der Gesamtheit und baumspezifisch untersucht. Die rotkernigen Proben sowie die Proben ohne Rotkern wurden dabei immer in unmittelbarer Nachbarschaft aus dem Probestamm entnommen.

Die Proben, die aus dem rotkernigen Bereich des Probestammes entnommen wurden, werden im Folgenden Buche mit Rotkern genannt. Proben aus dem unverfärbten Bereich des Stammes werden als Buche ohne Rotkern bezeichnet.

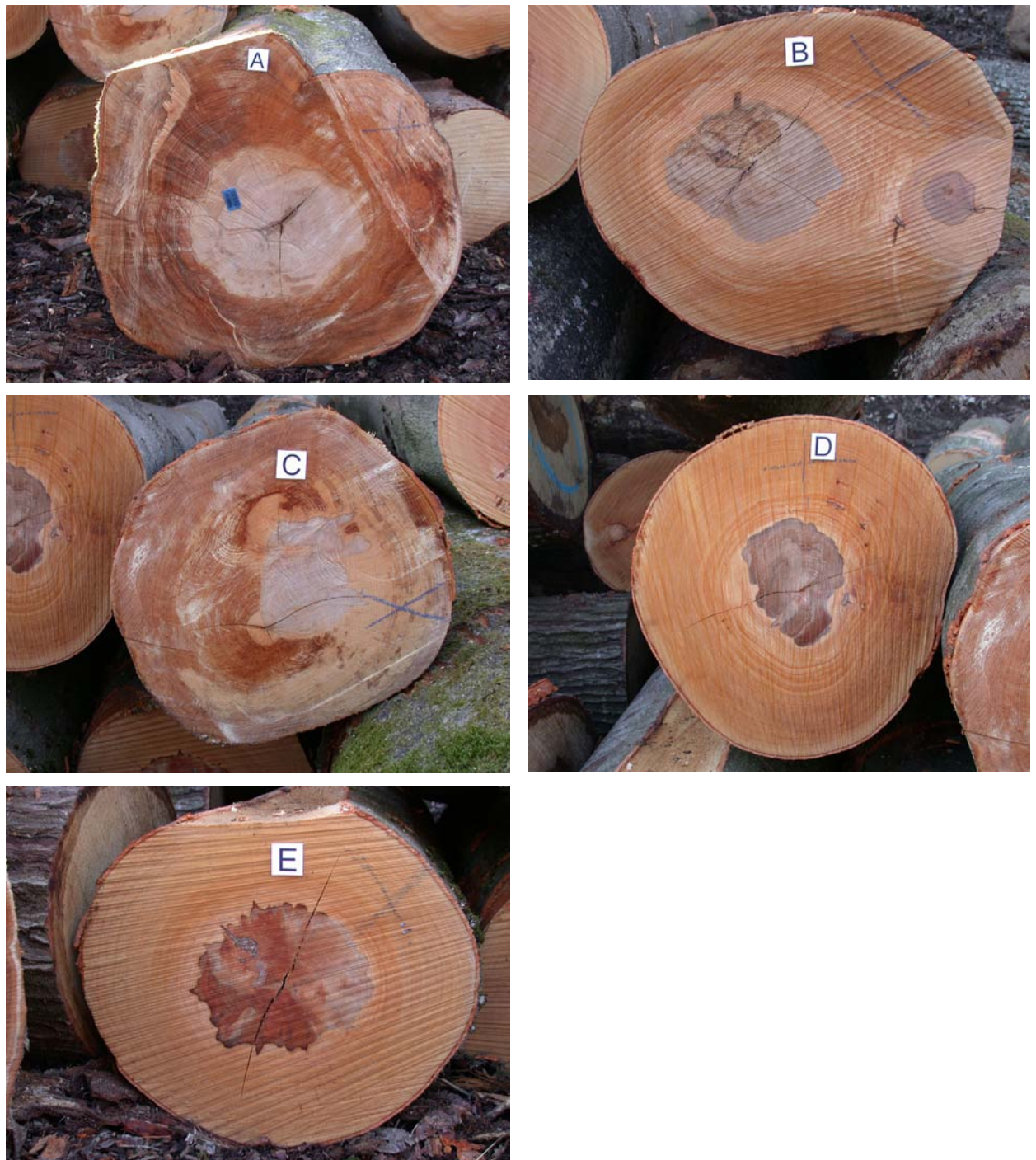


Abb. 2.2 Ausgewählte Probestämme

3 Prüfung der Farbbeständigkeit von rotkernigem Buchenholz

Ziel der Untersuchung war es, Informationen über das Farbverhalten von Buchenholz mit Rotkern im Vergleich zu Buchenholz ohne Rotkern bei Verwendung in Innenräumen zu erhalten. Werden Holzoberflächen längere Zeit dem Licht ausgesetzt, so treten Verfärbungen auf. Ausgelöst werden diese vor allem durch UV-Strahlung, zum Teil auch durch kurzwellige Strahlung im sichtbaren Bereich. Bei Holzbestandteilen, welche UV- oder kurzwellige Strahlung stärker absorbieren, wie Lignin, aromatische Verbindungen oder einige Holzinhaltsstoffe, löst die Strahlung chemische Reaktionen aus, die häufig mit Farbänderungen verbunden sind. Die meisten Hölzer dunkeln nach, helle Hölzer vergilben und in einigen Fällen erfolgt auch eine Aufhellung.

Gängige Meinung ist, rotkerniges Buchenholz verliert im Lauf der Zeit an Farbe und bleicht aus. Durch Lichtschutzstoffe wie UV-Absorber oder Radikalfänger, die in Anstrichstoffe eingemischt werden, versucht man, unerwünschte Verfärbungen von Holzoberflächen zu verhindern. Bei ausbleichenden Hölzern ist dies jedoch nach wie vor schwierig. Die Frage der Farbstabilität von rotkernigem Buchenholz gegenüber Umwelteinflüssen konnte bislang noch nicht abschliessend geklärt werden.

Die Änderung von Farbton, Farbsättigung und Helligkeit lassen sich photometrisch durch die Anwendung des CIE-Masssystems („Commission Internationale de l'Eclaire“) exakt bestimmen. Das Verfahren wurde auch im vorliegenden Projekt angewandt. Ziel war es, die Farbwirkung des unbehandelten Ausgangsmaterials, sowohl bei Buchenholz ohne Rotkern als auch bei Buchenholz mit Rotkern des gleichen Baumes sowie mehrerer Kollektive mit Anstrichen im Vergleich zu zeigen. Dazu wurden verschiedene Anstrichsysteme auf den Buchenoberflächen unter simulierter Alterung hinter Fensterglas untersucht, um das Farbverhalten der behandelten Oberfläche von rotkerniger Buche im Vergleich zu unverfärbter Buche beurteilen zu können. Eine erste Testserie umfasste in der Möbelindustrie gängige transparente Lacke sowie Öle und Wachse, eine zweite Testserie komplexere und z.T. neuartige Oberflächenbehandlungen, die UV-Absorber und Hals-Produkte (*Hindered Amine Light Stabilizers*) beinhalten.

3.1 Methodik der Farbmessung

Die Farbmessung ist in der DIN 5033 ^[22] festgelegt. Um Farbe zu messen, verwendet man in der Regel Spektralphotometer. Über den Remissionsgrad R_λ , dem Quotienten aus remittiertem Licht der Oberfläche und Weissstandard, sowie der Verteilung der Normalspektralwerte z_λ = blau, y_λ = grün und x_λ = gelb können rechnerisch alle Farbempfindungen bewertet werden. Die Berechnung der Farbwerte X, Y und Z erfolgt nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} X &= \sum (S_{\lambda} \cdot x_{\lambda} \cdot R_{\lambda}) \\ Y &= \sum (S_{\lambda} \cdot y_{\lambda} \cdot R_{\lambda}) \\ Z &= \sum (S_{\lambda} \cdot z_{\lambda} \cdot R_{\lambda}) \end{aligned} \quad \text{[Formel 3-1]}$$

mit: S_{λ} = spektrale Strahlungsverteilung der Planck'schen Strahlung

Der in dieser Arbeit verwendete CIEL*a*b-Farbraum (Abb. 3.1) wird nach folgender Transformationsgleichung hergeleitet, woraus sich ein empfindungsgemäss gleichabständiger Farbraum aufspannt:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \sqrt[3]{(Y / Y_n)} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\sqrt[3]{(X / X_n)} - \sqrt[3]{(Y / Y_n)} \right] \\ b^* &= 200 \left[\sqrt[3]{(Y / Y_n)} - \sqrt[3]{(Z / Z_n)} \right] \end{aligned} \quad \text{[Formel 3-2]}$$

mit: L^* ist der Helligkeitswert, a^* der entsprechende Rotwert auf der Abszisse und b^* der Gelbwert auf der Ordinate. Die Messung der Farbe wurde nach der CIELAB-Formel, DIN 6174 ^[23] vorgenommen.

Neben dem klassischen $L^*a^*b^*$ Werten können die Farbmesszahlen durch die abgeleitete Kenngrösse der Buntheit C^*_{ab} angegeben werden.

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad \text{[Formel 3-3]}$$

Aus den Daten a^* , b^* und L^* der vermessenen Probe und einem Referenzwert ergibt sich die empfindungsgemässe Farbdifferenz ΔE beziehungsweise die Helligkeitsdifferenz ΔL :

$$\Delta E = \left[(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 \right]^{1/2} \quad \text{[Formel 3-4]}$$

$$\Delta L = L_T - L_R \quad \text{[Formel 3-5]}$$

mit: L: Helligkeitswert
 a, b: Farbwert
 T: Testwert
 R: Referenzwert

Die ΔL - und ΔE -Werte werden bei der Auswertung von Farbmessungen (siehe Kapitel 3.4) als Vergleichsmasstab der Veränderungen angenommen. Der Helligkeitsunterschied ΔL zwischen der unbestrahlten Probe L_R und der Probe nach der Xenon-Bestrahlung L_T ist definiert durch die CIE 1976 psychometrische Helligkeitsdifferenz. Der gesamte Unterschied ΔE zwischen zwei Farben ist der geometrische Abstand ihrer Position im (L^*a^*b) Farbraum. In den Ergebnissen werden die ΔL - und ΔE -Werte nach 48 und 480 Stunden Bestrahlung angegeben, um einerseits die relative Veränderung der verschiedenen Proben vergleichen und andererseits den zeitlichen Verlauf beurteilen zu können.

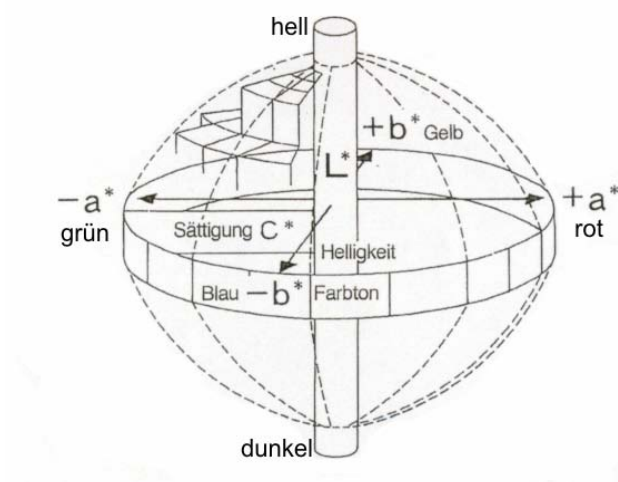


Abb. 3.1 CIEL*a*b* Farbraum, a und b stellen Farbwerte in Rot-Grün-Richtung bzw. Blau-Gelb-Richtung dar. L ist ein Wert für die Helligkeit.

3.2 Material

3.2.1 Probennahme

Die Untersuchungen zum Oberflächenverhalten wurden in zwei Serien durchgeführt. Für die 1. Probenserie zur Prüfung von in der Möbelindustrie gängigen Oberflächenbehandlungen (Tab. 3.1) wurden Furnierblätter verwendet, welche von der Firma Hess & Co AG, Sperrholz- u. Furnierwerk zu Verfügung gestellt wurden. Es wurde Schäl furnier verwendet, das ca. 60 h gedämpft und anschliessend getrocknet wurde. Die Furniere lagerten im Normalklima, bevor sie in Streifen von 40 mm zugeschnitten und mit 120er Körnung geschliffen wurden. Die Streifen wurden anschliessend zu 56 Proben ohne Rotkern und 56 Proben mit Rotkern à 100mm Länge aufgetrennt und bis zur Oberflächenbehandlung im Normalklima gelagert.

Für die 2. Probenserie wurden Oberflächenbehandlungen verwendet, die UV-Absorber und Hals-Produkte beinhalten (Tab. 3.2). Die Proben wurden wie für alle weiteren Versuche aus Probestämmen (siehe 2.4) entnommen. Nach Lagerung der Proben im Normalklima wurde das Holz in 60 Proben (je 12 pro Baum) ohne Rotkern und 60 Proben mit Rotkern aufgetrennt (100 mm x 44 mm x 5mm), mit 120er Körnung geschliffen und bis zur Oberflächenbehandlung im Normalklima gelagert.

3.2.2 Anstrichstoffe

Für die 1. Probenserie wurden stellvertretend für die verschiedenen in der Möbelindustrie eingesetzten Systeme Oberflächenbehandlungsprodukte der Firma Reform-Beizen & Lacke AG Baden, CH, verwendet.

Tab. 3.1 Übersicht über die verwendeten Oberflächenbehandlungen der 1. Serie.

	Oberflächenbehandlungsprodukte
System A	unbehandelt
System B	Öl (Reform-Natur Hartöl 315) visuelle Auswirkung des Anstrichs: Das Öl intensiviert die Farbe der Oberflächen, der Rotkern wirkt angefeuert und der Unterschied zum nicht rotkernigen Buchenholz intensiver.
System C	Wachs (Reform-Natur Hartwachs 328) visuelle Auswirkung des Anstrichs: Die Farbe wird etwas wärmer und intensiver, jedoch nicht in so deutlichem Masse wie bei System B.
System D	PUR/Acrylat/Copolymer wasserverd. (Reform-HydroDuro 551) visuelle Auswirkung des Anstrichs: System D verändert die Farbwirkung der Oberfläche kaum.
System E	PUR/Acrylat/PE lösemittelhaltig (Reform-DD-Astrodur-Klarlack 1001) visuelle Auswirkung des Anstrichs: Oberfläche erscheint leicht dunkler und intensiver, etwa vergleichbar mit System C.
System F	Nitrocellulose/ Alkydharz (Reform-Zweischichtenlack 2630) visuelle Auswirkung des Anstrichs: Lediglich eine leichte Intensivierung der Farbwirkung.
System G	Acrylat wasserverd. (Reform-HydroFlex 501) visuelle Auswirkung des Anstrichs: Etwas matter, sonst kaum von den unbehandelten Proben zu unterscheiden.

Die Oberflächenbehandlungsprodukte für die 2. Probenserie stammen von Ciba Speciality Chemicals (CH) (1, 2), Sachtleben Chemie GmbH (D)(3), Feyco (CH) (4), Clariant (F) (5).

Tab. 3.2 Übersicht über die verwendeten Oberflächenbehandlungen der 2. Serie.

	Oberflächenbehandlungsprodukte
System 1	Grundierung: Lignostab 1198 1-2%; Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1-2% Tinuvin 99-2 visuelle Auswirkung des Anstrichs: Verdunkelt und intensiviert die Oberflächen, wirkt warm, der Unterschied zwischen Buchenholz mit Rotkern und Buchenholz ohne Rotkern tritt nicht deutlicher hervor.
System 2	Grundierung: Lignostab 1198 1-2%; Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1% CGL 777 MPA visuelle Auswirkung des Anstrichs: Mit System 1 vergleichbar, jedoch etwas weniger intensiv.
System 3	Lack: Reform Hydroflex 501 + 0.5-1% Hombitec RM 300 WP visuelle Auswirkung des Anstrichs: Kaum vom unbehandelten Zustand zu unterscheiden, Oberfläche wirkt leicht milchig.
System 4	Lack: Monodur Einkomponenten visuelle Auswirkung des Anstrichs: Intensiviert und verdunkelt die Oberfläche leicht mit einem Stich ins gelbliche.
System 5	Lack: Reform Hydroflex 501 + 1-2% UVA Sanduvor disp. XP + 1% Hals sanduvor 3021-2 disp. X visuelle Auswirkung des Anstrichs: Leichte Intensivierung der Oberfläche.
System 6	unbehandelt

Die Anstrichsysteme beider Serien wurden nach Herstellerangaben gemischt und manuell auf die Probenkörper aufgetragen. Die Proben verblieben zum Aushärten mind. 24h in Normalklima. Um einen möglichen Einfluss der Schichtdicke des Anstrichs auf die Ergebnisse beurteilen zu können, wurde diese zusätzlich in Anlehnung an die ISO 2808 ^[24] vermessen. Es wurden 12 Schichtdickenmessungen je System durchgeführt.

3.3 Bestrahlung

Zur Überprüfung der Farbbeständigkeit von rotkerniger Buche im Vergleich zu nicht verfärbter Buche wurden unbehandelte Proben sowie mit verschiedenen Lacksystemen behandelte Proben künstlich bestrahlt. Die künstliche Bestrahlung dient der Alterung von Materialien unter zeit-

raffenden Bedingungen. Allgemein gültige Zusammenhänge zwischen Alterungsvorgängen bei natürlicher Beanspruchung im Freien sind wegen der Vielzahl der Einflussgrößen nur teilweise zu erwarten. Ergebnisse natürlicher Beanspruchung im Freien sind daher orientierenden Charakters. Für künstliche Beanspruchung hinter Fensterglas, wie sie im Folgenden angewendet wurde, gilt dies ebenso, jedoch in geringerem Masse.

Die Durchführung erfolgte nach DIN 53387 ^[25]. Die Proben werden dabei *dauernd* bestrahlt, das heisst, sie sind permanent der Strahlungsquelle zugewandt. Die Strahlungsquelle war ein Xenonbogenstrahler, dessen spektrale Anteile dem Sonnenlicht angepasst wurden. Dieses Bestrahlungsverfahren entspricht der Realität (z.B. Möbel hinter Fensterglas) mehr als eine blosser UV-Bestrahlung dies leisten kann. Aus Erfahrungswerten ergibt sich für Mitteleuropa durch diese Bestrahlung eine Zeitraffung um den Faktor 10. Die im Versuch durchgeführte Bestrahlung von 480h entspricht daher etwa einem halben Jahr nach Süden ausgerichteter Exposition hinter Fensterglas in unseren Breitengraden. Die Proben wurden in einem Atlas Ci35A Xenon weatherometer in Zyklen von 48 Stunden für 480 Stunden bei einer Luftfeuchte von 40% und einer Temperatur von 40°C bestrahlt. Die Proben wurden so in den Probenhalter eingespannt, dass die rotkernige und nichtrotkernige Probe unmittelbar nebeneinander lagen (Abb. 3.2). Die Farbveränderung der Holzoberflächen durch die Bestrahlung wurde fotografisch festgehalten und gemessen. Die Farbmessungen wurden vor der Oberflächenbehandlung, vor der ersten Bestrahlung sowie nach jedem Bestrahlungszyklus (48h) mit einem Mikroflash-Gerät durchgeführt. Die kreisförmige Messfläche hatte einen Durchmesser von 10mm. Pro Messung wurde jeweils der L, a, und b-Wert ermittelt. So konnte die Veränderung der Probenoberfläche kontinuierlich verfolgt werden. Im Ergebnisteil ist der zeitliche Verlauf der Farbveränderung durch die Entwicklung der ΔL - und ΔE -Werte während 480h Bestrahlung dargestellt [4, 5]. Im Anhang sind der zeitliche Verlauf der jeweiligen L-, a- und b-Werte der Farbmessung jeder Oberflächenbehandlung sowie die fotografische Dokumentation der jeweiligen Farbveränderung vor und nach der künstlichen Bestrahlung zu finden.



Abb. 3.2 Aufsicht auf die Probeneinspannung



Abb. 3.3 Probenkammer des Xenon weather-ometer

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Oberflächenbehandlung verändert die Farbwirkung der Oberfläche zum Teil beträchtlich. Bei der Beschreibung der Anstrichstoffe wurde daher auch die Auswirkung des Anstrichs auf das visuelle Farbempfinden beschrieben. Es wurden folglich einerseits die Veränderungen der Farbwirkung der behandelten Oberflächen rotkerniger Buche und normaler Buche jeweils derselben Oberflächenbehandlung verglichen. Zudem wurde andererseits die Farbwirkung der Probengesamtheit im unbehandelten Zustand verglichen, um die Homogenität der unbehandelten Probenkollektive beurteilen zu können. Es wurden dazu die a^* - und b^* -Werte (bzw. die daraus abgeleitete Buntheit C^*) sowie die Helligkeit L^* des nicht rotkernigen mit dem rotkernigen Kollektiv der 1. Serie (Furnierblätter) sowie der 2. Serie (Baum A-E) verglichen.

3.4.1 Ergebnisse der Untersuchung der unbehandelten Probenkollektive

Im unbehandelten Ausgangszustand hat die Buche ohne Rotkern der 1. Serie im Mittel einen höheren b^* -Wert als die Buche mit Rotkern. Sie tendiert mehr in Gelbrichtung des a^*b^* -Farbraumes. Die Buche mit Rotkern hingegen erreicht etwas höhere a^* -Werte, tendiert also mehr in die Rotrichtung. Der Unterschied der Mittelwerte der Buntheit C^* [3] sowie der Helligkeit L^* zwischen Rotkern und Buche ohne Rotkern erweist sich als höchst signifikant (Signifikanzniveau 0.1%). Die Streuung der Helligkeit des rotkernigen Kollektivs ist breiter als das der Buche ohne Rotkern (Abb. 3.4).

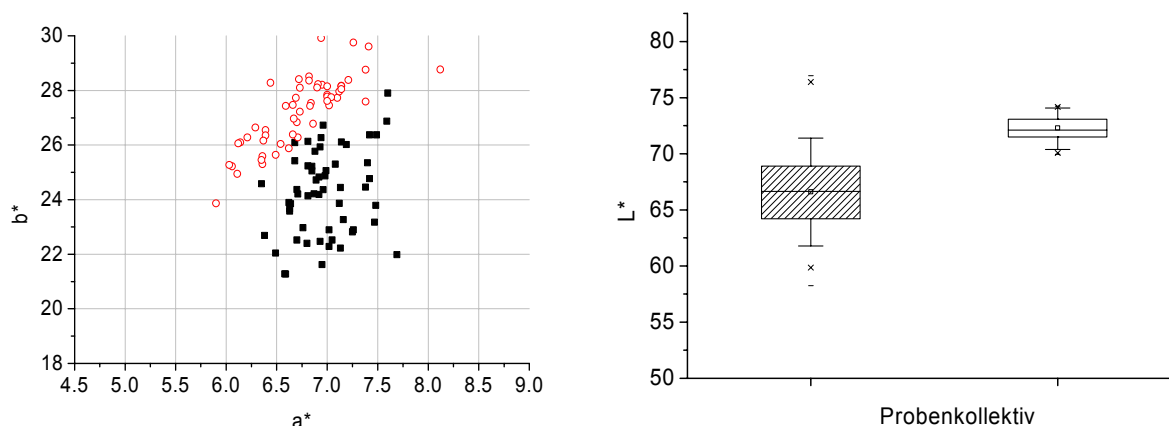


Abb. 3.4 Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des rotkernigen Probekollektives (■) und Probekollektives ohne Rotkern (○) der 1. Probenserie. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des rotkernigen (schraffierte box) und des Probekollektives ohne Rotkern (weisse box) der 1. Probenserie

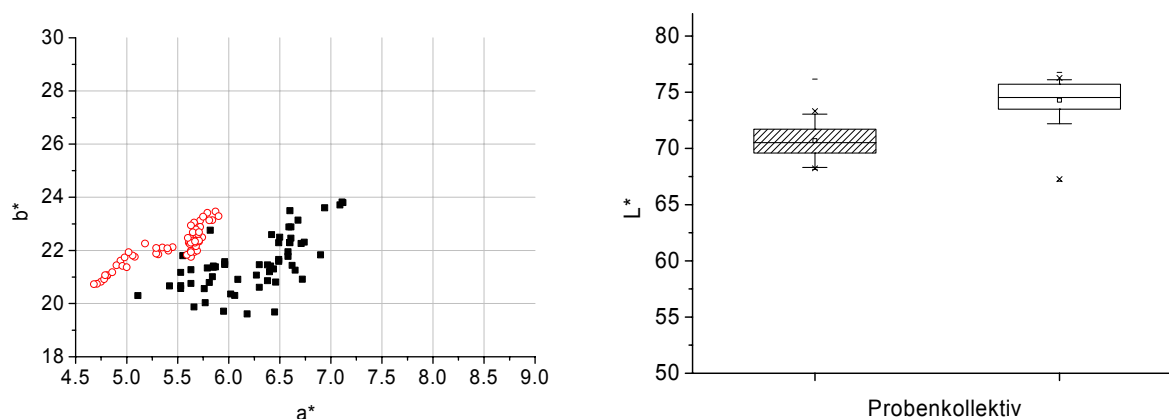


Abb. 3.5 Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des rotkernigen Probekollektives (■) und Probekollektives ohne Rotkern (○) der 2. Probenserie. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des rotkernigen (schraffierte box) und des Probekollektives ohne Rotkern (weisse box) der 2. Probenserie

Die Buche ohne Rotkern und mit Rotkern der 2. Serie haben ähnliche b^* -Werte, d.h. einen vergleichbaren Gelbanteil. Die rotkernige Buche hingegen erreicht deutlich höhere a^* -Werte, tendiert also stärker wie das Kollektiv der 1. Serie in die Rotrichtung. Der Unterschied der Mittelwerte des Buntheit C^* [3] sowie der Helligkeit L^* zwischen rotkerniger und nicht rotkerniger Buche erweist sich wie bei der 1. Serie als höchst signifikant. Die Streuung der Helligkeit des rotkernigen Kollektivs und der nicht rotkernigen Buche sind vergleichbar. In dieser Hinsicht ist das rotkernige Kollektiv der 2. Serie homogener (Abb. 3.5).

Die geringere Streuung der Helligkeit L^* des rotkernigen Kollektivs der 2. Serie zeigt sich auch im Vergleich der Variationskoeffizienten (Tab. 3.3).

Tab. 3.3 Zusammenfassung der Mittelwerte, Standardabweichung und Variationskoeffizienten der Farb-
 werte der 1.- und 2. Serie vor der Behandlung (RK = Rotkern, nRK = kein Rotkern)

			\bar{x} [-]	s [-]	V [%]
1.Serie	L*	RK	66.60	3.56	5.34
		nRK	72.29	1.12	1.55
	C*	RK	25.22	1.53	6.07
		nRK	28.19	1.47	5.21
2. Serie	L*	RK	70.68	1.60	2.26
		nRK	74.28	1.82	2.45
	C*	RK	22.41	1.09	4.88
		nRK	22.80	0.74	3.25

3.4.2 Ergebnisse der Untersuchung nach der Oberflächenbehandlung

Die Beurteilung der Ergebnisse in Form von ΔL - und ΔE -Werten stellt eine möglichst objektive Methode dar. Sie erlaubt es, relative Unterschiede im Farbverhalten gut darzustellen. Als subjektive Unterstützung der Ergebnisbeurteilung kann eine visuelle Einschätzung der Veränderung dienen, daher wurden die Proben während den Messintervallen auch visuell beurteilt. Im Anhang (Tafel 1-13 in 9.1) sind Ergebnisse der Farbmessung und fotografische Dokumentation der Farbveränderung für jede Oberflächenbehandlung gesondert dargestellt. Dies ermöglicht eine anschauliche Interpretation der Ergebnisse.

Tab. 3.4 Schichtdicken der Oberfläche der einzelnen Systeme der 1. und 2. Serie, n=14

1.Serie			2.Serie		
System	\bar{x} [μm]	s [μm]	System	\bar{x} [μm]	s [μm]
B	63.40	9.85	1	109.8	14.5
C	44.5	14.8	2	88.7	10.5
D	44.4	6	3	38.7	5.45
E	86.65	8.05	4	54.25	8.1
F	42.35	5.5	5	61.5	5.55
G	106.75	8.6			

Die gemessenen Schichtdicken sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Die Abb. 3.6 zeigt stellvertretend für alle Behandlungssysteme eine mikroskopische Aufnahme eines Querschnittes von mit Reform Hydroflex 501 + 0.5-1%Hombitec RM 300 WP behandeltem Buchenholz und deren Schichtdicken. Beim Vergleich mit den Ergebnissen der Farbmessung konnte kein direkter Einfluss der Schichtdicke auf das Farbverhalten festgestellt werden.

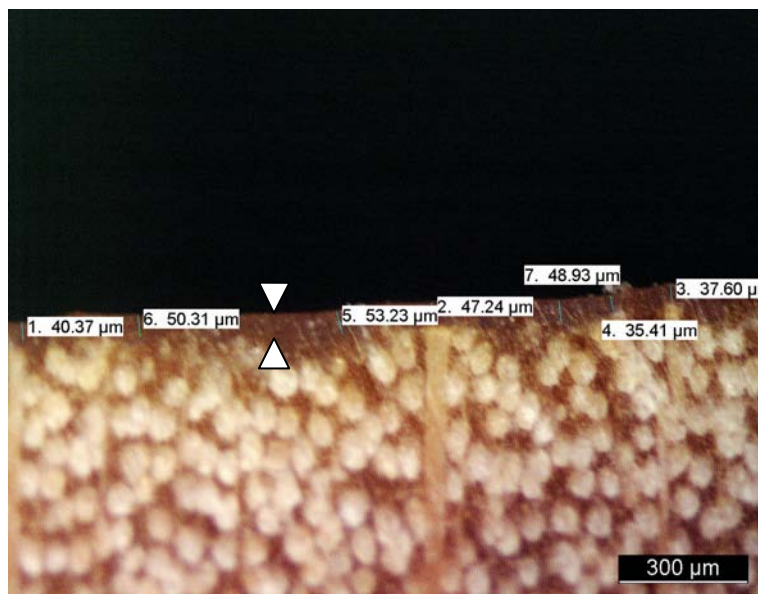


Abb. 3.6 Querschnitt einer mit Reform Hydroflex 501 + 0.5-1% Hombitec RM 300 WP behandelten Buchenholzprobe und Schichtdickenmessung der Lackschicht (mikroskopische Aufnahme)

3.4.2.1 Visuelle Beurteilung

Bereits nach 48h Bestrahlung findet eine Angleichung besonders der Helligkeits-Werte der Probenkollektive statt. Danach ändern sich die Farbwerte zwar noch kontinuierlich weiter (vgl. Tafeln 1-13 in 9.1), dies verändert den visuellen Eindruck aber kaum mehr. Es lässt sich feststellen, dass sich die Farbwirkung von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern deutlich angleichen.

Tendenziell dunkelt die nicht verfärbte Buche erwartungsgemäss etwas nach, während die Buche mit Rotkern unbehandelt sowie unter den einzelnen Anstrichsystemen die Prägnanz ihrer Färbung eher verliert.

Es ist im Zeitraum der durch die Xenon-Bestrahlung simulierten Bestrahlung keine Vergrauung zu beobachten, weder bei Buche mit Rotkern noch bei Buche ohne Rotkern. Die Farbwirkung ist stark von der Oberflächenbehandlung abhängig. Der visuelle Vergleich der unverfärbten Buchenoberfläche und der rotkernigen Buchenoberfläche zeigt keinen Unterschied im Farbverhalten während des Beobachtungszeitraums.

3.4.2.2 Farbmessung 1.Serie: Konventionelle Oberflächenbehandlungssysteme

In den Ergebnissen der Untersuchung der ΔL - und ΔE -Werte nach CIE 1976 ^[22] wird die unterschiedliche Wirkung der einzelnen Oberflächensysteme deutlich. In der ersten Serie weisen die rotkernigen Proben eine deutlichere Streuung in den Ergebnissen auf (größere Standardabweichung, dargestellt als Fehlerbalken). Die Ursache liegt in der im Vergleich zum unverfärbten Buchenholz größeren farblichen Heterogenität des Rotkernes dieser Probenserie (siehe 3.4.1).

Die Helligkeitsunterschiede ΔL infolge der Bestrahlung folgen bei Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern derselben Tendenz, sind also neben der Rotkernigkeit auch von der Art der Oberflächenbehandlung beeinflusst. Buche mit Rotkern weist hinsichtlich der Helligkeitsänderung unabhängig von der Oberflächenbehandlung etwas höhere ΔL -Werte auf als Buche ohne Rotkern (Abb. 3.7, Abb. 3.8). System A-C und F dunkeln bei Buche ohne Rotkern nach, System D, E und G verändern sich leicht zu mehr Helligkeit. Bei Buche mit Rotkern hingegen ist bei System A-C und F ein leichtes Nachdunkeln zu erkennen, D, E und G verschieben sich in ihrer Farbwirkung deutlicher zu mehr Helligkeit. Im Vergleich ist die Veränderung hin zu einer helleren Farbwirkung bei Buche mit Rotkern grösser. Bei anfänglich niedrigerer Ausgangshelligkeit der rotkernigen Buche bestätigt dies die visuelle Einschätzung einer Angleichung der Farbwirkung der verfärbten und unverfärbten Proben im Zuge der Bestrahlung. Es fällt zudem auf, dass bei System F und G bei Buche ohne Rotkern sowie bei System B und C bei Buche mit Rotkern auf ein anfängliches Nachdunkeln eine Helligkeitssteigerung erfolgt.

Die gesamthaften Veränderungen der Farbwirkung ΔE (Abb. 3.9 - Abb. 3.12) über den Bestrahlungszeitraum ist bei Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern der 1. Serie etwa gleich. Die Streuung der rotkernigen Proben ist auch hier grösser. Die unbehandelten Proben (A) zeigen klar die deutlichsten Veränderungen, obwohl die Veränderung deren Helligkeit gering war. Die Veränderung der Farbwirkung in Folge der Bestrahlung spielt sich offenbar mehr in der Wirkung der Buntheit der Oberflächen ab.

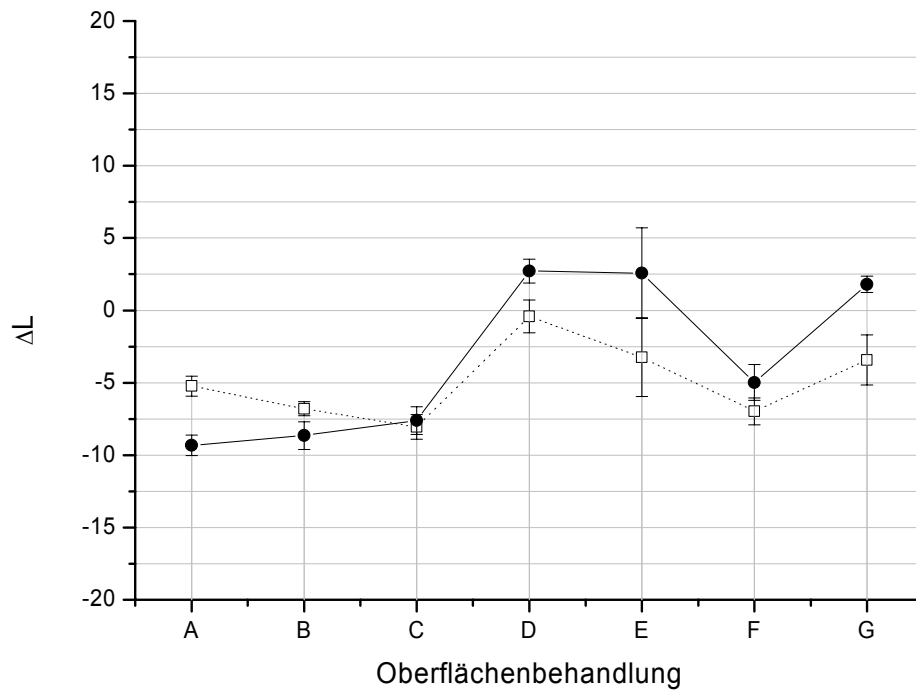


Abb. 3.7 Serie 1: ΔL nicht rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

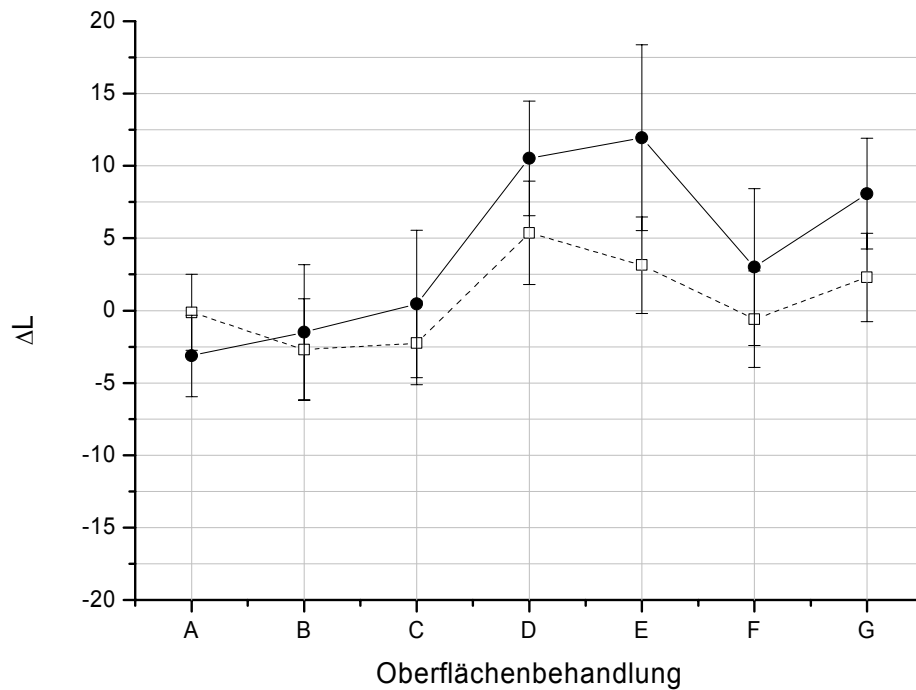


Abb. 3.8 Serie 1: ΔL rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

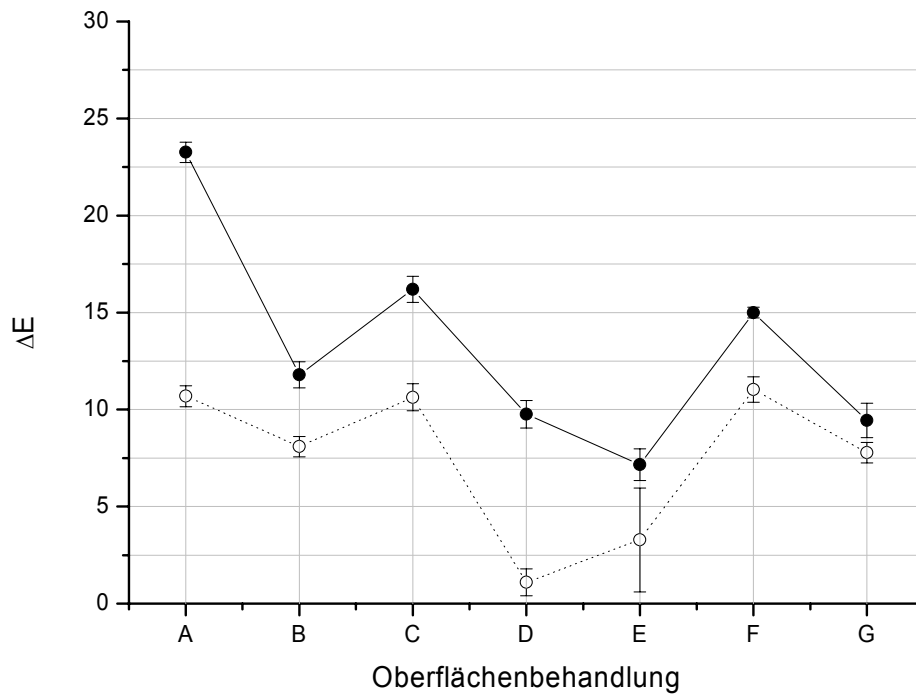


Abb. 3.9 Serie 1: ΔE nicht rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

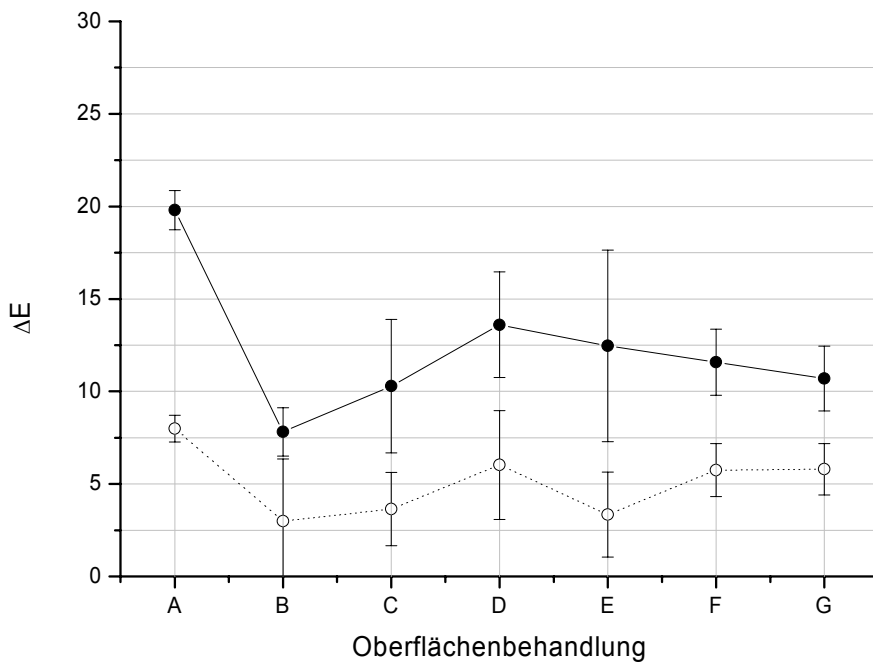


Abb. 3.10 Serie 1: ΔE rotkernige Buche. -□- ΔE nach 48h, -●- ΔE nach 480h.

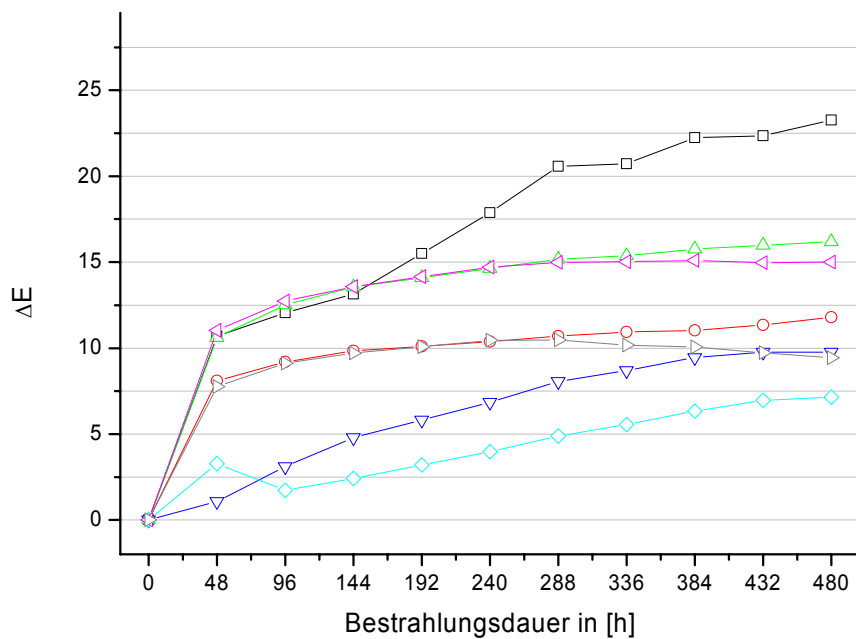


Abb. 3.11 Serie 1: Vergleich ΔE aller Oberflächenbehandlungen (System A-G) an Buche ohne Rotkern.

(-□- A, -○- B, -△- C, -▽- D, -◇- E, -◀- F, -▷-G).

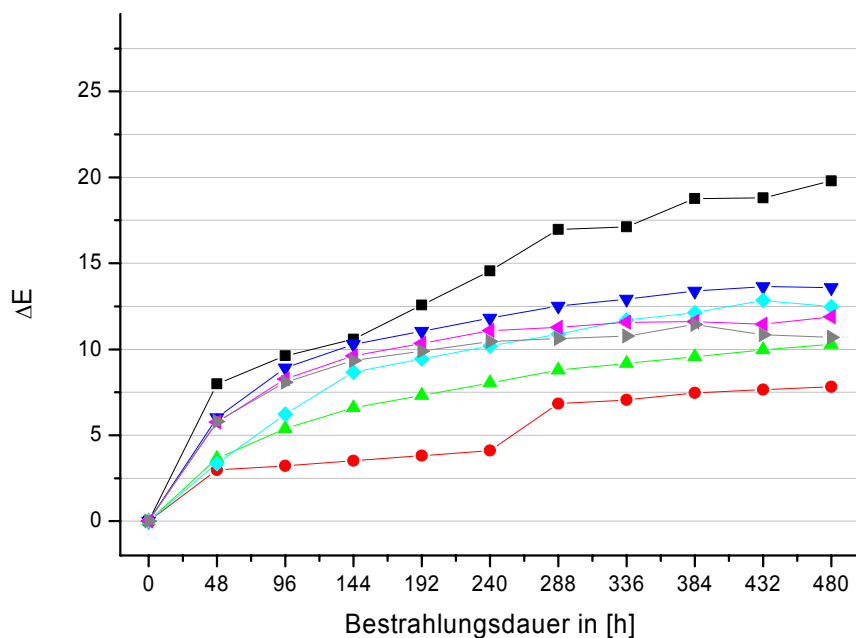


Abb. 3.12 Serie 1: Vergleich ΔE aller Oberflächenbehandlungen (System A-G) an rotkerniger Buche.

(-■- A, -●- B, -▲- C, -▼- D, -◆- E, -◀- F, -▶-G).

3.4.2.3 Farbmessung 2. Serie: Neuere Oberflächenbehandlungssysteme

Für die 2. Versuchsserie stand ein homogeneres Sortiment an rotkernigen Proben zu Verfügung. Die Streuung der Werte ist deutlich geringer als in der 1. Serie.

Die Helligkeitsunterschiede infolge der Bestrahlung folgen bei Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern auch in der zweiten Serie je nach Oberflächenbehandlung (Abb. 3.13, Abb. 3.14) derselben Tendenz. Die Helligkeitsveränderungen an den rotkernigen Proben sind generell etwas höher. System 1-5 durchläuft bei Buche ohne Rotkern ebenso wie bei Buche mit Rotkern eine Aufhellung, die unbehandelte Probenserie 6 hingegen dunkelt leicht nach. Es fällt zudem auf, dass Probenserie 6 der zweiten Serie ähnlich wie die unbehandelte Probenserie A der ersten Serie während der Bestrahlung die geringste absolute Helligkeitsänderung durchläuft. Dies deutet darauf hin, dass Veränderungen der Helligkeit massgeblich auf die Beschichtung und deren Veränderung im Lauf der Bestrahlung und weniger auf Veränderungen der Holzfarbe zurückzuführen sind. Die Ergebnisse der Helligkeitsuntersuchung beziehen sich wohlgerne auf den Zustand der beschichteten Proben vor und nach der Bestrahlung und spiegeln nicht die Veränderung der Farbwirkung durch die Beschichtung an sich wider. Diese ist zum Teil beträchtlich (vgl. Tafeln im Anhang).

Die Betrachtung der ΔE -Werte zeigt, dass sich diese beschichtungsabhängige Veränderung lediglich auf die Helligkeitswirkung bezieht, bei der gesamthaften Veränderung ΔE liegt die unbehandelte Probenserie 6 erwartungsgemäss am höchsten (Abb. 3.15, Abb. 3.16). Buche mit Rotkern durchläuft gesamthaft eine etwas höhere Farbveränderung als Buche ohne Rotkern. Das gesamthafte Ergebnis der ΔE -Werte der 2. Serie schneidet im Vergleich zur ersten Probenserie bestenfalls gleichwertig ab. Die Integration von UV-Absorbern + Radikalfängern in die Behandlungssysteme der zweiten Probenserie beeinflusst das Ergebnis in dieser Versuchsreihe nur teilweise positiv. Es konnte nicht ermittelt werden, inwieweit die Änderung der Farbwirkung der einzelnen Proben auf die vom Behandlungssystem einzudämmenden photochemischen Veränderungen in der Holzoberfläche oder auf Veränderungen in der Beschichtung selbst zurückzuführen ist.

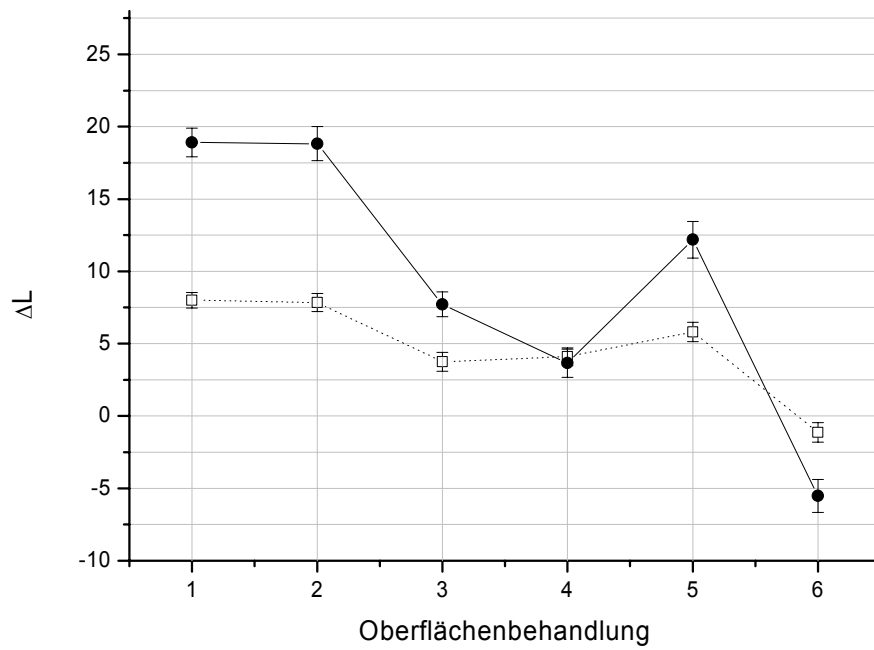


Abb. 3.13 Serie 2: ΔL nicht rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

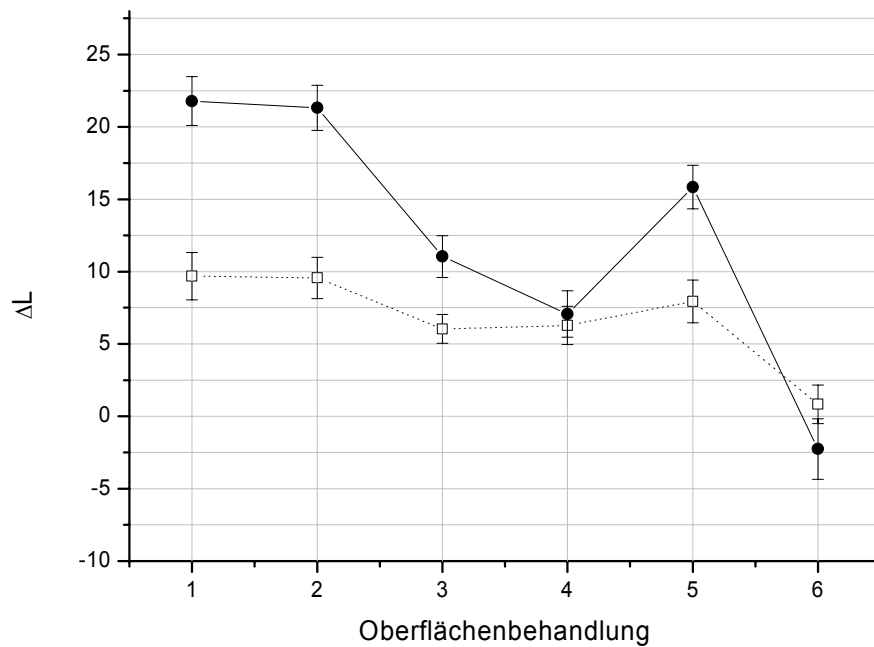


Abb. 3.14 Serie 2: ΔL rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

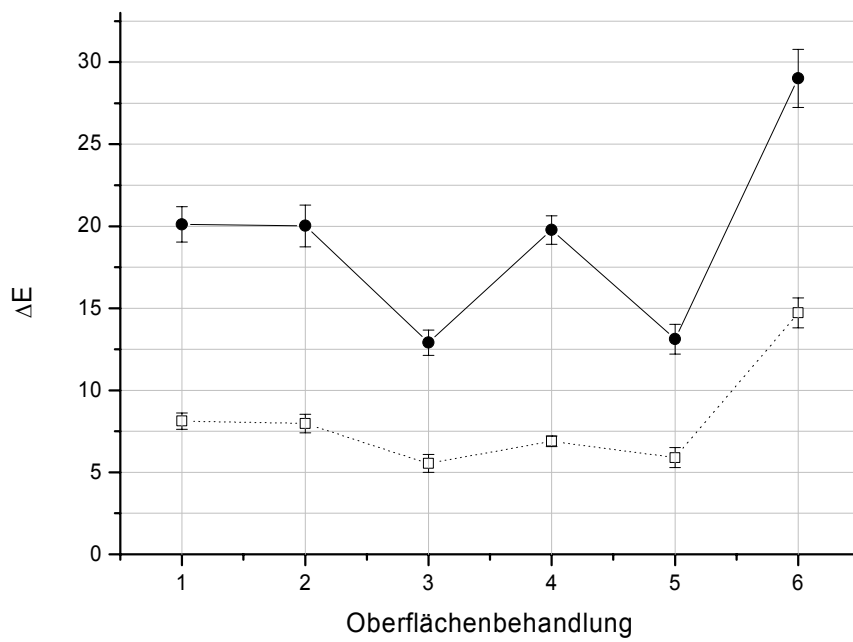


Abb. 3.15 Serie 2: ΔE nicht rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

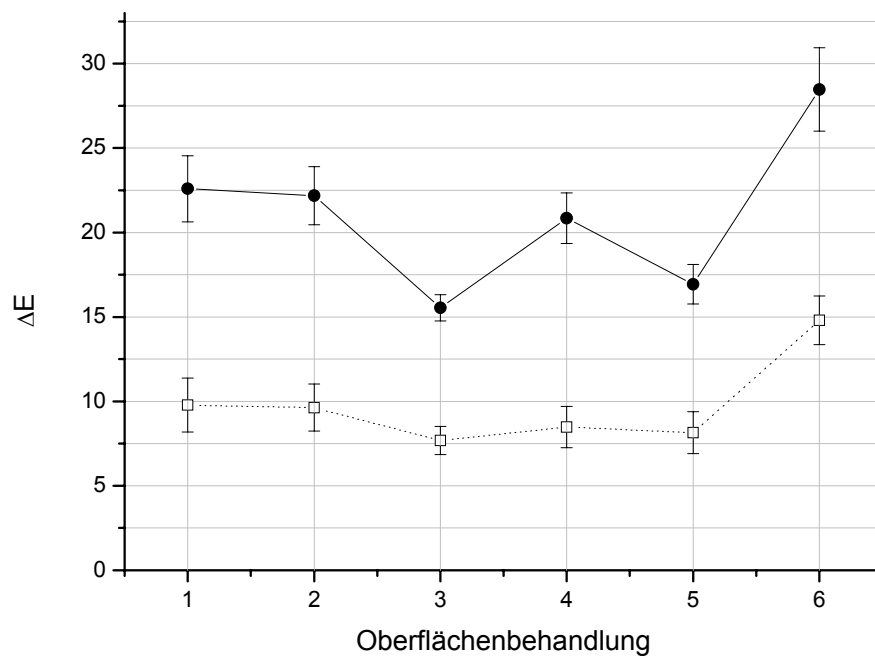


Abb. 3.16 Serie 2: ΔE rotkernige Buche. -□- nach 48h, -●- nach 480h.

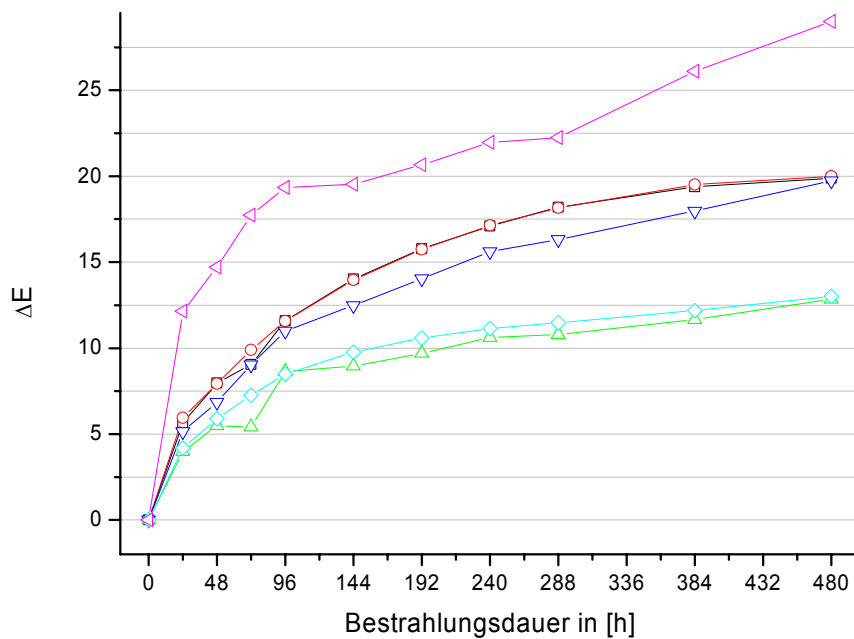


Abb. 3.17 Serie 2: Vergleich ΔE aller Oberflächenbehandlungen (System 1-6) an nicht rotkerniger Buche.

(-□- 1, -○- 2, -△- 3, -▽- 4, -◇- 5, -◀- 6)

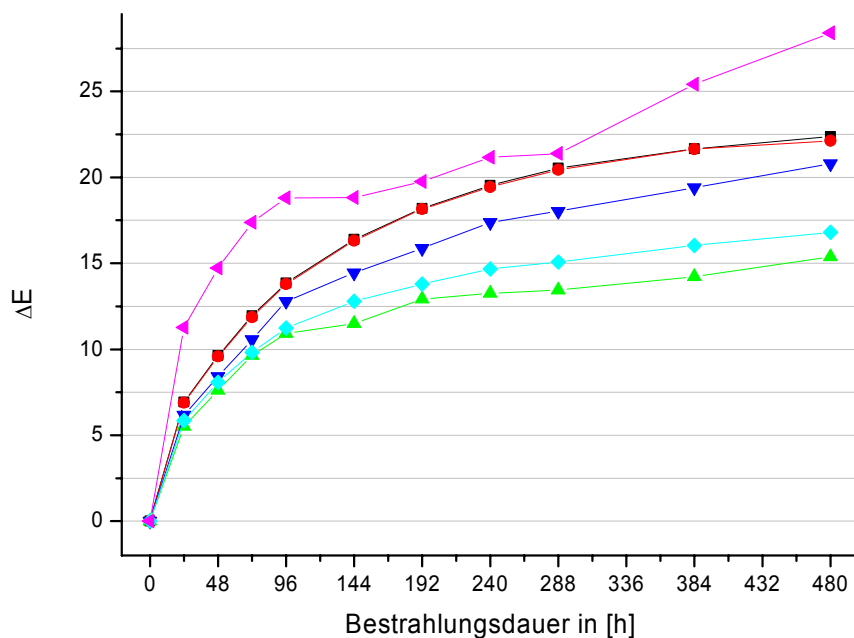


Abb. 3.18 Serie 2: Vergleich ΔE aller Oberflächenbehandlungen (System 1-6) an rotkerniger Buche.

(-■- 1, -●- 2, -▲- 3, -▼- 4, -◆- 5, -◀- 6.)

4 Physikalische und mechanisch-technologische Eigenschaften von rotkernigem Buchenholz

Der Einsatz von rotkernigem Buchenholz als Massenware erscheint sinnvoll und wird angestrebt. Sollen grössere Mengen dieses Sortimentes in andere Verwendungen als den Möbelbereich fliessen, ist die Kenntnis der technologischen und elastomechanischen Eigenschaften von rotkernigem Buchenholz notwendig. In der Literatur werden diese zumeist als dem unverfärbten Buchenholz gleichwertig beschrieben. Die diesen Aussagen zu Grunde liegenden Untersuchungsergebnisse sind aber kaum veröffentlicht. Denkt man über einen Einsatz zur Herstellung von Brettschichtholz oder Holzwerkstoffen wie Furnierschichtholz nach, so dürfen mechanisches Verhalten oder Verklebungseigenschaften des rotkernigen Anteils die Produktqualität nicht negativ beeinflussen. Um diese Frage nicht nur aufgrund von Erfahrung und Literaturdaten zu beantworten und eine Bewertung zu ermöglichen, wurden als Grundlage für weitere Untersuchungen der Biege-Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit sowie die Härte und das Quell- und Schwindverhalten des Probenmaterials der einzelnen Versuchsstämme untersucht.

4.1 Elastomechanik

4.1.1 Methode

Der Biege-Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit wurden nach DIN 52186 ^[26] bestimmt. Die damit einhergehende Untersuchung der Rohdichte sowie des Feuchtegehalts der Proben bei der Prüfung wurden nach DIN 52182 ^[27] und DIN 52183 ^[28] vorgenommen. Die Anzahl der Jahrringe der individuellen Proben der elastomechanischen Untersuchung wurde ermittelt, um somit den Einfluss der unterschiedlichen Verteilung von Früh- und Spätholz in den Proben bewerten zu können.

4.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Rohdichte des untersuchten Buchenholzes aller Probestämme liegt bei 650-760 kg/m³. Die Dichte des rotkernigen Sortimentes ist im Mittel leicht erhöht. Einzig bei Baum E ist der Dichteunterschied auffälliger. Betrachtet man die Probengesamtheit X, so ist der Roh- wie auch der Darrdichteunterschied zwischen rotkernigem Buchenholz und Buchenholz ohne Rotkern für ein Signifikanzniveau von 5% signifikant (Abb. 4.1, Abb. 4.2).

Entsprechend der leicht erhöhten Dichte der rotkernigen Proben verhält sich auch der Feuchtegehalt der Proben zum Zeitpunkt der 3-Punkt-Biege Prüfung (Abb. 4.3).

Neben dem Unterschied in Dichte und Feuchte zwischen den rotkernigen Proben und den Proben ohne Rotkern zeigen sich bei den rotkernigen Proben breitere Zuwachszonen. Breite Jahrringe führen bei zerstreutporigen Hölzern in der Regel zu einem grösseren Anteil an gefässarmem bzw. faserreichem Holz. Besonders bei Buche, einem Laubholzvertreter mit relativ dicken Faserwänden ^[29] kann daher ein breiter Jahrring zu erhöhter Rohdichte führen. Die Beziehung zwischen Rohdichte und Jahrringbreite ist bei zerstreutporigen Hölzern generell jedoch nicht so eng ist wie bei Nadelhölzern oder ringporigen Hölzern. Klebes ^[4] sowie Klotzenburg ^[30] konnten bei einer grösseren Stichprobenanzahl bei Buche einen vergleichbaren Effekt nicht erkennen. Der Einfluss der Jahrringbreite auf die Rohdichte war dort allenfalls schwach ausgeprägt.

Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul sind zwischen Buche mit und ohne Rotkern ebenfalls vergleichbar, wobei auch hier die rotkernigen Proben etwas höhere Werte erreichen. Die Ergebnisse folgen hier der unterschiedlichen Dichte der Proben. Betrachtet man die Unterschiede innerhalb der einzelnen Probestämme, so bleibt lediglich Baum A ein wenig unterhalb der als gängig angenommen elastomechanischen Eigenschaften der Buche. Der beobachtete leichte Unterschied erweist sich bezogen auf die Probengesamtheit auch bei der Biegefestigkeit und beim Elastizitätsmodul als signifikant (Signifikanzniveau 5%). Erwartet wurde kein Unterschied oder allenfalls eine etwas niedrigere Festigkeit der rotkernigen Proben auf Grund ihrer relativen Nähe zur Markröhre. Die rotkernigen Proben wurden jedoch mit dem grösstmöglichen Abstand zur Markröhre entnommen, um den Einfluss von juvenilem Holz, das in der Regel etwas weitleumiger und weniger dicht ist, zu begrenzen. Anstatt des juvenilen Holzes beeinflusste vielmehr die höhere Dichte der rotkernigen Proben die Ergebnisse. Molnar et al. ^[5] allerdings beschreiben in ihrer Untersuchung, dass das Auftreten von juvenilem Holz im Markbereich rotkerniger Buchestämme die technologischen Eigenschaften der Probensortimente beeinträchtigte.

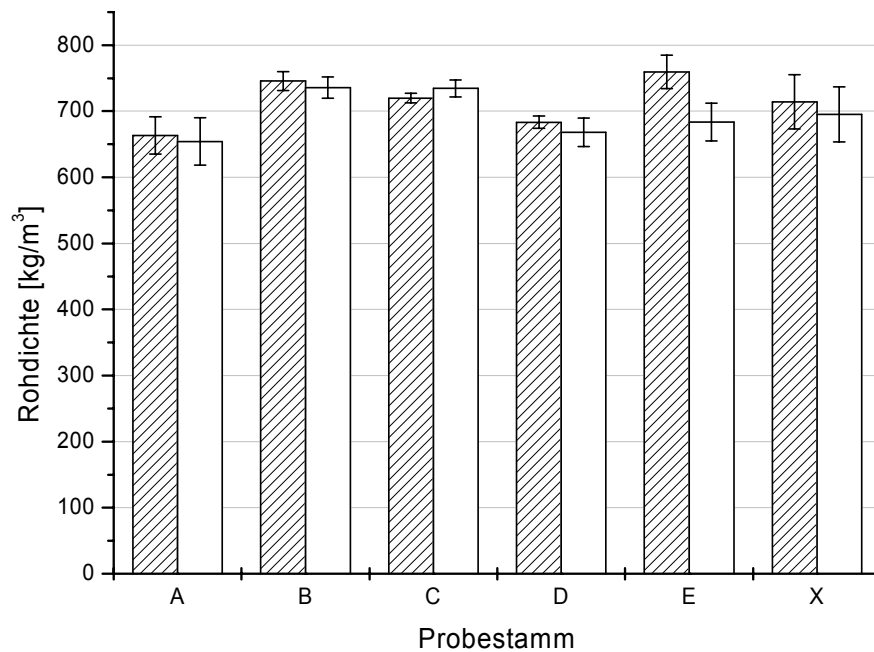


Abb. 4.1 Dichteunterschiede der feuchten Proben der einzelnen Versuchstämme bei der Prüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weißer Balken: Buche ohne Rotkern.

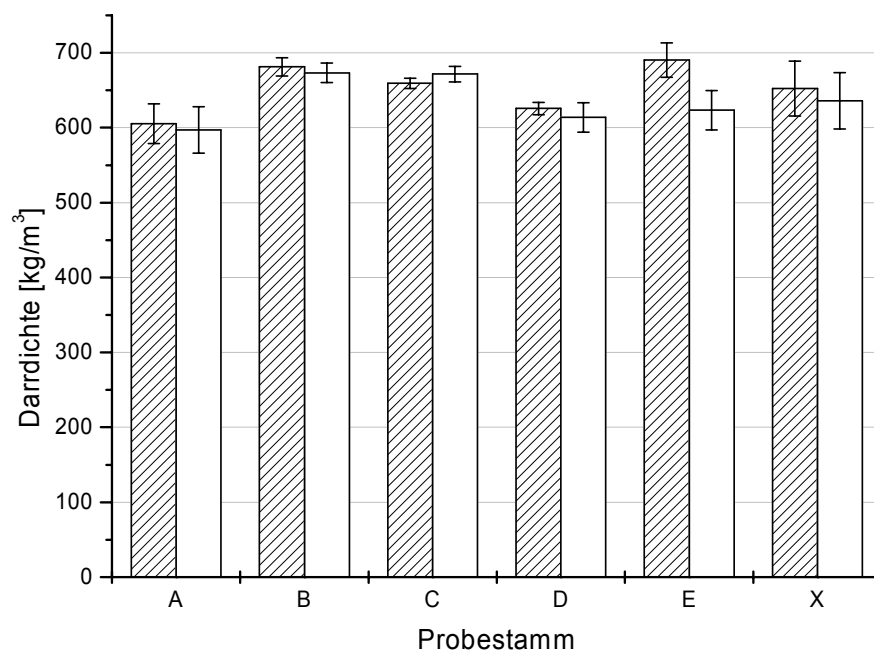


Abb. 4.2 Darrdichte der Proben der einzelnen Versuchstämme. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weißer Balken: Buche ohne Rotkern.

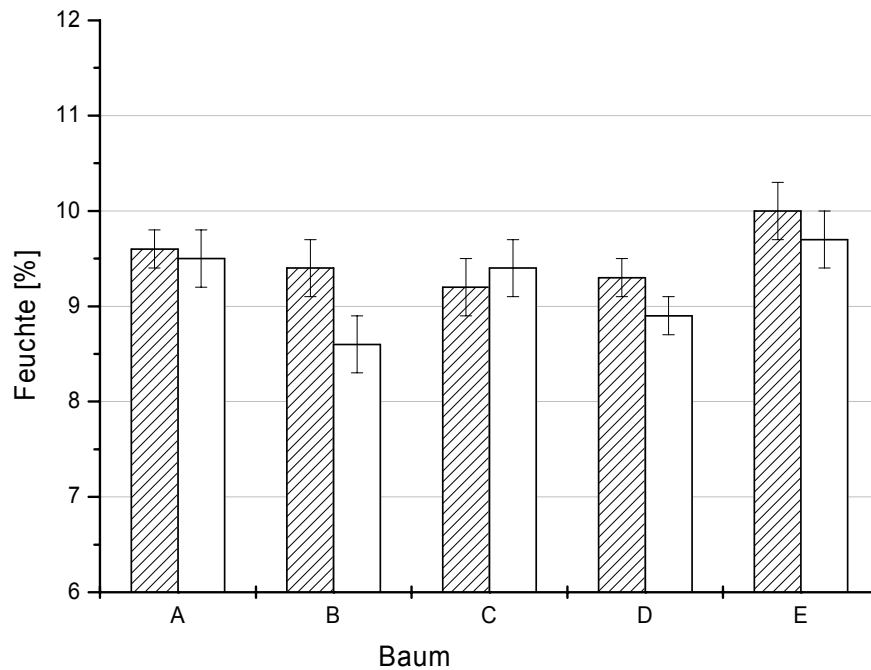


Abb. 4.3 Holzfeuchte der Proben der einzelnen Versuchsstämme bei der Biegeprüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

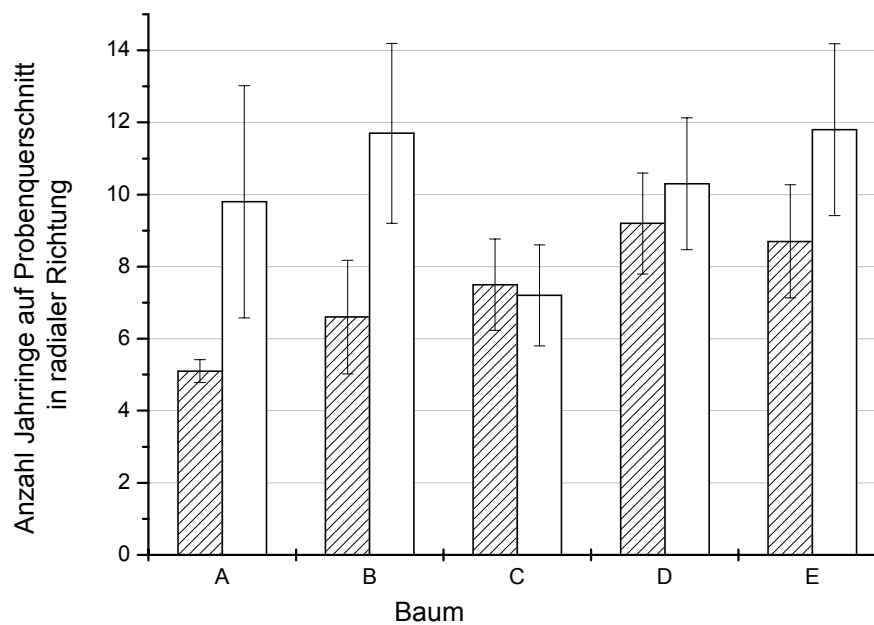


Abb. 4.4 Jahringanzahl der untersuchten Proben. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

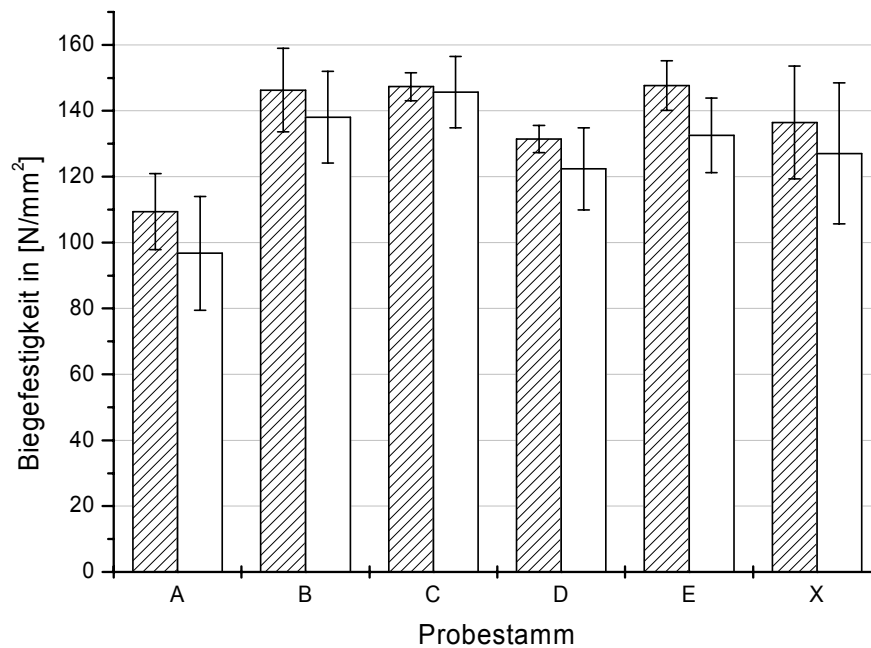


Abb. 4.5 Biegefestigkeit der Proben der einzelnen Versuchsstämme. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

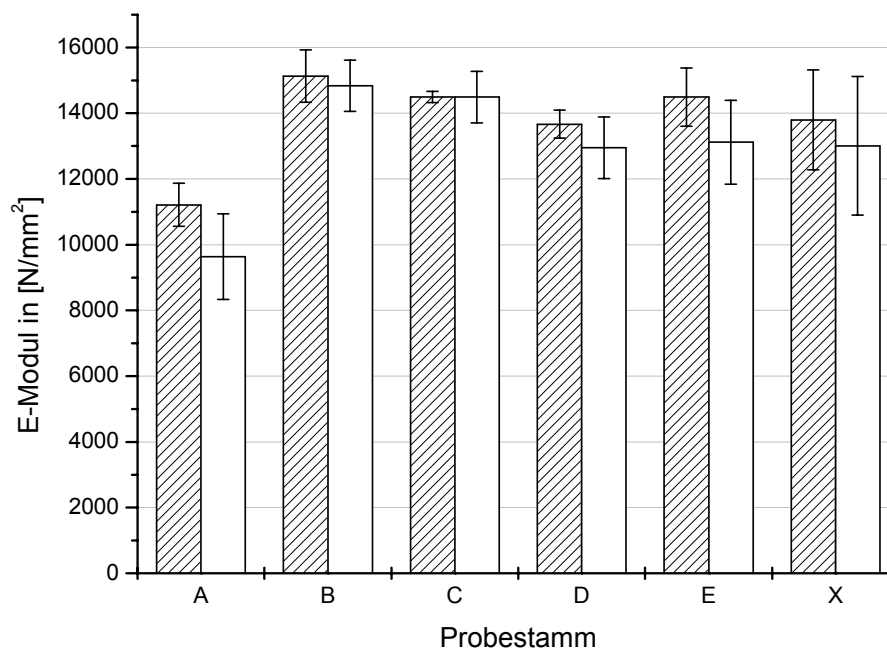


Abb. 4.6 Elastizitätsmodul der Proben der einzelnen Versuchsstämme. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

4.2 Brinell-Härte

4.2.1 Material und Methode

Aus den 5 Buchenstämmen wurden rotkernige und nicht rotkernige Probekörper mit den Massen 40x40 mm und maximal erreichbarer Länge (mind. 500 mm) geschnitten. Die Probekörper wurden bis zur Gewichtskonstanz im Normalklima (20°C / 65% r.L.) gelagert. Pro Baum wurden jeweils 2 rotkernige und 2 nicht rotkernige Proben verwendet.

Je Probe erfolgten 30 Messungen in radialer und tangentialer Richtung mit je 2 cm Abstand, so dass die Anzahl der Messpunkte pro Baum und Schnittrichtung 60 betrug.

Die Härtemessungen nach Brinell erfolgten nach dem von Stübi und Niemz (2000) ^[31] beschriebenen Verfahren über die Erfassung des Eindringweges einer Kugel. Dabei wird mit einem Tastfuss der Weg der Stahlkugel von der ersten Berührung der Probenoberfläche bis zum Ende der Entlastung aufgezeichnet. Gemessen werden die Kraft und die Eindringtiefe der Kugel. Die Brinellhärte kann bestimmt werden nach

$$H_B = \frac{F}{D \times \pi \times h} \quad \text{[Formel 4-1]}$$

(H_B = Brinellhärte in N/mm^2 ; F = Prüfkraft in N; D = Durchmesser der Kugel in mm; h = Eindringtiefe in mm)

Die Messungen erfolgten in Anlehnung an die ehemalige DIN C 3011. Die Härtemessungen wurden mit einer Prüfkraft von 1000 N durchgeführt. Die Kugel wurde 20 sec be- und entlastet, die Haltezeit der Maximalkraft betrug 30 sec.

4.2.2 Ergebnisse

Tab. 4.1 und Abb. 4.7 zeigen die Zusammenstellung der Messergebnisse der Härteprüfungen für rotkernige und nicht rotkernige Buche. Zwischen den beiden Varianten wurden deutliche Unterschiede in der Brinellhärte festgestellt.

Im Vergleich wies der Rotkern in **tangentialer Richtung** bei den Bäumen A, B und D signifikant höhere Werte auf als Buche ohne Rotkern (bei Baum E konnten aufgrund von ungenügender Probenqualität keine Prüfungen in tangentialer Richtung durchgeführt werden). Bei Baum C kann bei der Härte in tangentialer Richtung von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. In **radialer Richtung** zeigen sich geringere

Unterschiede bezüglich der Brinell-Härte, tendenziell ist die Härte bei Rotkern höher. Bei den Bäumen B, C und E sind die Unterschiede signifikant.

Ein t-Test über die Probengesamtheit zeigte, dass die Unterschiede der Brinell-Härte von Buche mit Rotkern im Vergleich zu Buche ohne Rotkern in tangentialer Richtung signifikant sind, in radialer Richtung nicht signifikant.

Tab. 4.1 Vergleich der Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern (Stämme A-E) bezüglich Brinellhärte (H_B) in radialer und tangentialer Richtung (Minimal-, Maximalwerte, Mittelwerte fett)

Baum	Buche mit Rotkern			Buche ohne Rotkern		
	Rohdichte (kg/m ³)	H_B tang. (N/mm ²)	H_B rad. (N/mm ²)	Rohdichte (kg/m ³)	H_B tang. (N/mm ²)	H_B rad. (N/mm ²)
A	663.3	20.37... 26.81 ...32.05	18.65... 21.90 ...24.74	654.2	20.55... 24.83 ...32.05	18.58... 21.87 ...24.98
B	745.6	26.41... 32.22 ...37.95	23.70... 26.31 ...28.99	735.8	23.83... 27.86 ...31.72	22.43... 25.43 ...29.46
C	720	24.72... 28.78 ...30.77	26.27... 28.85 ...32.42	734.7	25.89... 28.83 ...34.37	24.45... 27.25 ...29.61
D	683.4	20.40... 26.96 ...31.66	19.89... 22.93 ...26.57	668.2	22.20... 25.98 ...30.77	20.20... 22.69 ...25.66
E	759.5		24.59... 27.98 ...32.71	683.7		24.24... 25.05 ...26.12
Mitt	714.36	28.69	25.59	695.32	26.87	24.46

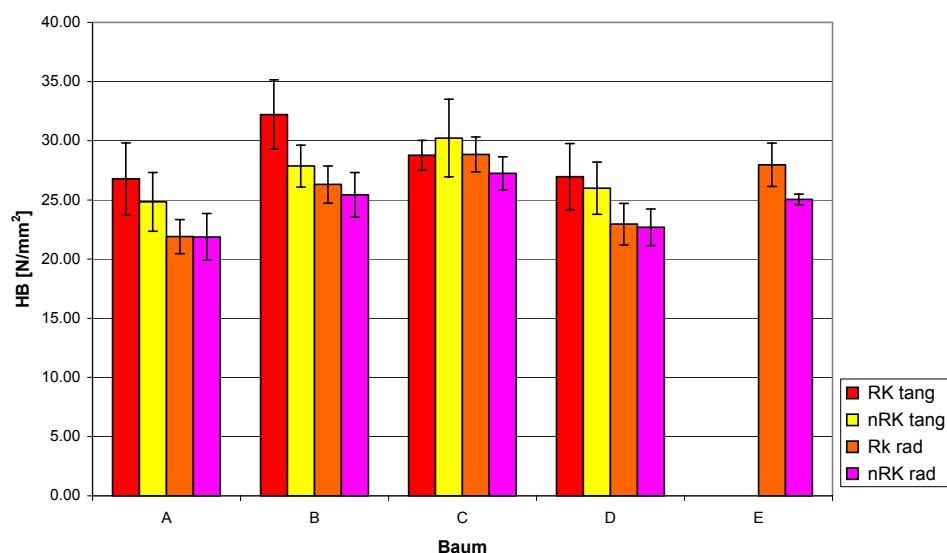


Abb. 4.7 Vergleich der Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern (Stämme A-E) bezüglich Brinellhärte (H_B) in radialer und tangentialer Richtung (Mittelwerte)

Die Abb. 4.8 zeigt den Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte (berechnet unter Verwendung der Mittelwerte der Rohdichte und Härte pro Baum und Variante). Wie erwartet steigt mit zu-

nehmender Rohdichte die Brinellhärte an. Die Proben in tangentialer Richtung weisen bei den rotkernigen, als auch bei den nicht rotkernigen Proben deutlich höhere Härten auf als die in radialer Richtung. Der Regressionskoeffizient bei den rotkernigen Varianten in radialer und tangentialer Richtung liegt zwischen 0.71 und 0.88 und bei den nicht rotkernigen Varianten zwischen 0.54 (radial) und 0.58 (tangential).

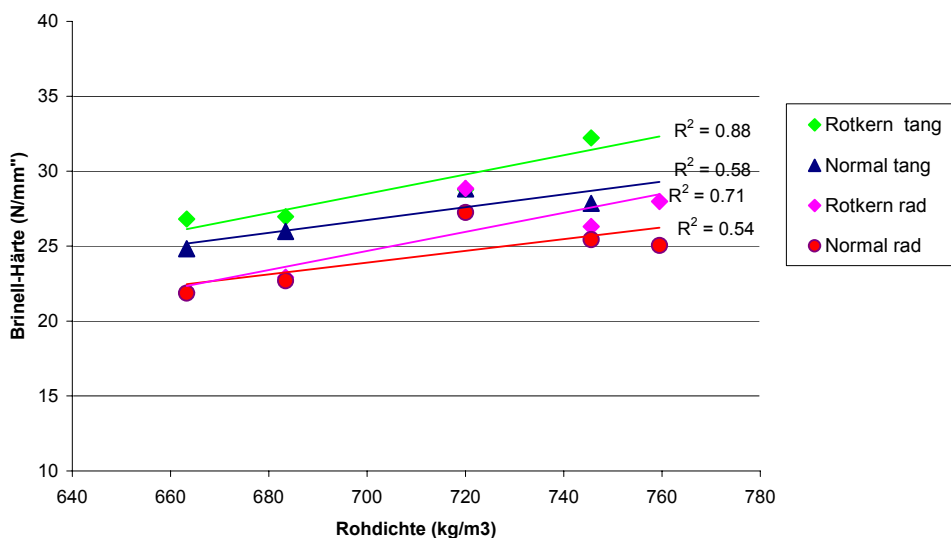


Abb. 4.8 Beziehung zwischen Brinell-Härte und Rohdichte bei Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern mit linearen Regressionen für jede Variante. Jeder Punkt entspricht den Mittelwerten der Härtemessungen der Bäume A-E.

4.2.3 Diskussion

Zur Ermittlung der Härte gibt es eine Vielzahl von Prüfmethoden, deren Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Da in diesem Projekt die Härtevergleiche zwischen rotkernigem und nicht rotkernigem Holz innerhalb der Probestämme des Projektes verglichen werden sollten und nicht der Vergleich zu Werten aus der Literatur im Vordergrund stand, schien das neue Verfahren nach Stübi und Niemz^[31] für diese Untersuchungen geeignet und wurde daher ausgewählt.

Die Abb. 4.8 verdeutlicht den Einfluss der Rohdichte auf die Brinell-Härte. Da die rotkernigen Proben jeweils höhere Rohdichten aufwiesen als die nicht rotkernigen Proben (Ausnahme Baum C), waren auch die gemessenen Härten der rotkernigen Proben höher als die der Proben ohne Rotkern.

Wenig Forschung wurde bisher in Bezug auf Untersuchungen der Brinell-Härte von rotkernigem Holz betrieben. Lediglich Molnar ^[32] verglich die Härten und zeigte durch seine Untersuchungen, dass die Härte der Buche mit Rotkern sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung bis 10% höher lagen als die von Buche ohne Rotkern (siehe Tab. 2.1). Diese Differenzen konnten in den hier durchgeführten Untersuchungen generell bestätigt werden, allerdings nicht in der gleichen Grössenordnung. Hier lagen die Unterschiede in tangentialer Richtung im Mittel bei +6.35% und in radialer Richtung im Mittel bei + 4.42%.

4.3 Quellung und Schwindung

4.3.1 Methode

Beim Einsatz von Laubholzlamellen in BSH-Trägern oder vergleichbaren Holzwerkstoffen spielt das hygroskopische Verhalten des Holzes eine wichtige Rolle. Im Vergleich zu Nadelhölzern quellen und schwinden Laubhölzer mehr. Um abzuklären, ob das Quell- und Schwindverhalten in einem Buchensortiment mit Anteil an rotkerniger Buche homogen ist, wurden Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern in ihrem hygroskopischen Verhalten verglichen. Die Bestimmung der Quellung und Schwindung der Proben wurde nach DIN 52184 durchgeführt ^[33]. Es wurden jeweils die Rohdichte, das differentielle Quellmass in tangentialer q_t und radialer q_r Richtung sowie die Quellungsanisotropie A_q untersucht [5-1, 5-2]. Die Proben wurde dazu in Prüfkörper mit den Massen 20x20x10 mm Stücke aufgeschnitten und deren Holzfeuchte bei 20°C in 35%, 65% und 85% relativer Luftfeuchte bestimmt.

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0(u_F - u_T)} \cdot 100 \quad \text{[Formel 4-2]}$$

$$A_q = \frac{q_t}{q_r} \quad \text{[Formel 4-3]}$$

mit:

u_F und u_T : Gleichgewichtsholzfeuchte im Feucht- und Trockenklima

l_F und l_T : Längen im Feucht- und Trockenklima nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes

l_0 : Länge im darrtroffenen Zustand

4.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die differentielle Quellung q ist das prozentuale Quellmass je 1% Holzfeuchteänderung. Die Quellungsanisotropie A_q ist das Verhältnis der tangentialen zur radialen differentiellen Quellung des Holzes.

Tab. 4.2 Differentielles Quellmass und Quellungsanisotropie von Buche mit und ohne Rotkern

	Buche mit Rotkern	Buche ohne Rotkern	Buche Literatur	Fichte Literatur
Differentielles Quellmass radial q_r	0.24	0.21	0.20	0.19
Differentielles Quellmass tangential q_t	0.45	0.44	0.41	0.36
Quellungsanisotropie A_q	1.91	2.10	2.05	1.89

Es zeigt sich, dass die Buche mit Rotkern wie in den Versuchen zur Elastomechanik eine leicht erhöhte Rohdichte hat. Das Quellverhalten der Buche mit Rotkern ist ebenso erhöht. Das hygroskopische Verhalten der Buche mit Rotkern ist jedoch homogener. Dies äussert sich in einer niedrigeren Quellungsanisotropie. Während das differentielle Quellmass in tangentialer Richtung nahezu gleich ist, erweisen sich die Unterschiede zwischen der Buche ohne Rotkern und der Buche mit Rotkern hinsichtlich des differentiellen Quellmasses in radialer Richtung sowie der Quellungsanisotropie als signifikant (Niveau 1%). Eine niedrigere Quellungsanisotropie wirkt sich günstig auf das Stehvermögen des Holzes aus. Das Quell- und Schwindverhalten spricht auf Grund dieser Erkenntnisse nicht gegen einen Einsatz von einem Sortiment an Buchelamellen mit einem Anteil an rotkernigen Lamellen beispielsweise in BSH.

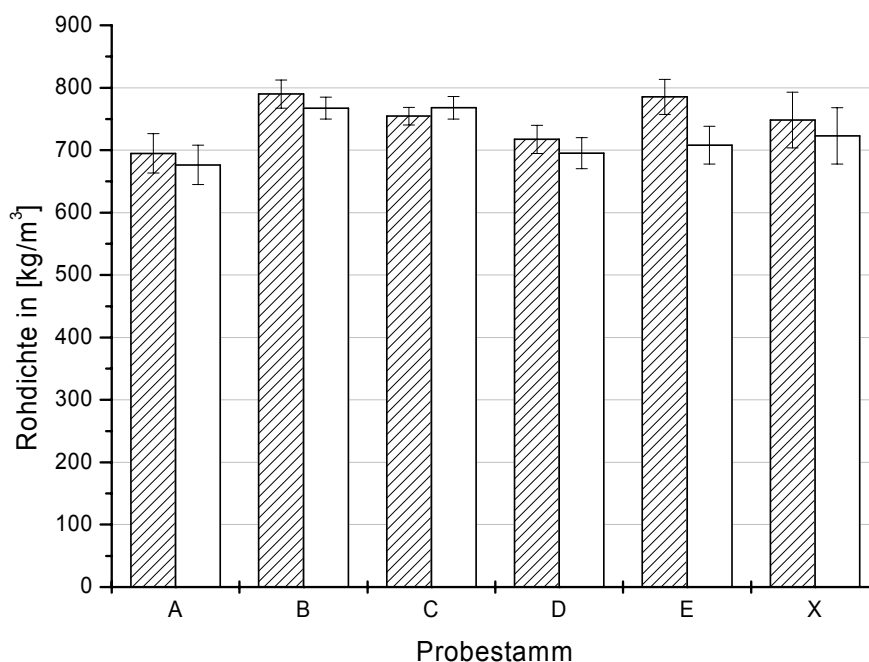


Abb. 4.9 Rohdichte der Proben der Quell- und Schwindprüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisses Balken: Buche ohne Rotkern.

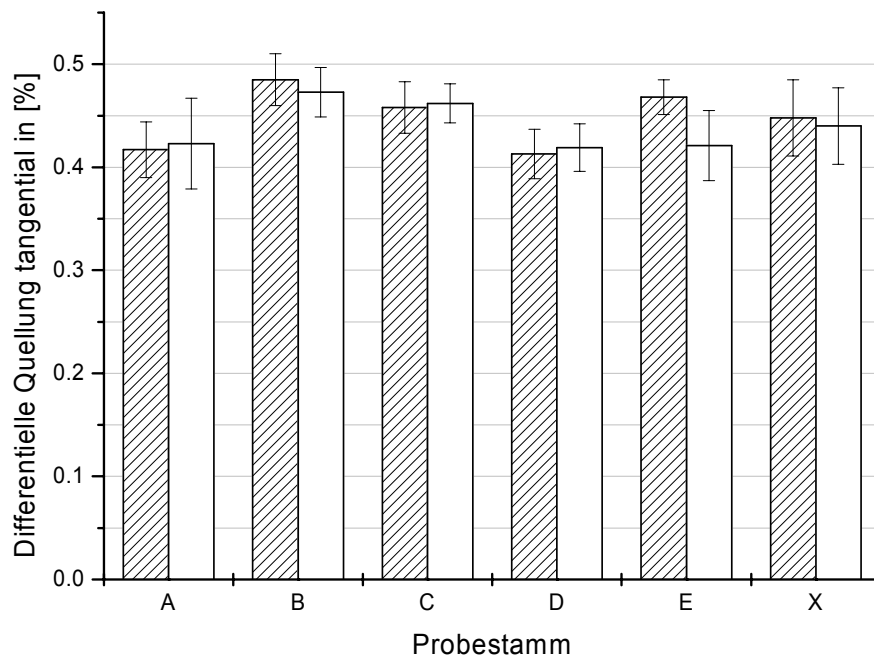


Abb. 4.10 Differentielle Quellung in tangentialer Richtung der Proben der Quell- und Schwindprüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

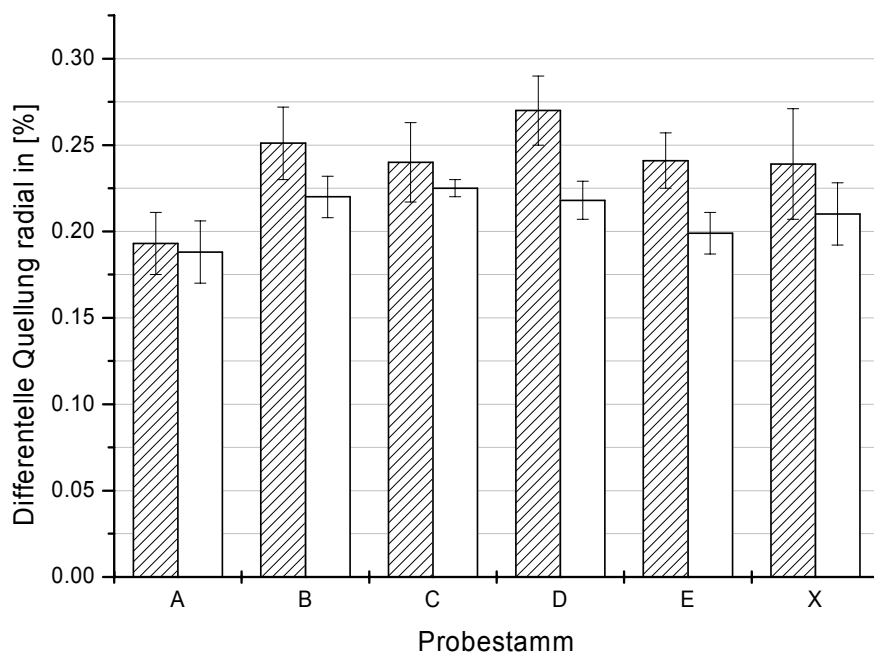


Abb. 4.11 Differentielle Quellung in radialer Richtung der Proben der Quell- und Schwindprüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

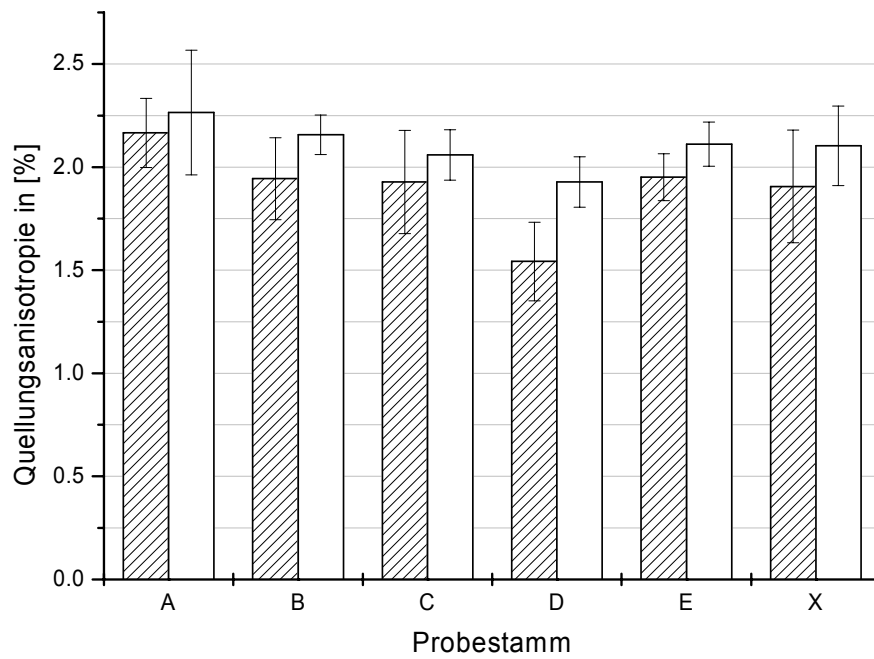


Abb. 4.12 Quellungsanisotropie der Proben der Quell- und Schwindprüfung. Schraffierter Balken: Buche mit Rotkern. Weisser Balken: Buche ohne Rotkern.

5 Verklebungsverhalten von rotkernigem Buchenholz

5.1 Fragestellung

Brettschichtholz (BSH) für den konstruktiven Ingenieurbau wird bisher fast ausschliesslich aus Nadelholz hergestellt. Obwohl Buchenholz in grossen Mengen zur Verfügung steht, bessere elastomechanische Eigenschaften, geringere Astigkeit und eine entsprechende Optik aufweist, wird Buchenholz bisher kaum zu BSH verarbeitet. Vor diesem Hintergrund sind Überlegungen über eine zusätzliche Wertschöpfung des Buchenholzes und speziell des geringwertigen rotkernigen Holzes als BSH sinnvoll. Im Rahmen von diesem Projekt wurde die Möglichkeit der Verwendung von rotkernigem Buchenholz als BSH für den Einsatz im Innenbereich untersucht. Zunächst wurden die Biegefestigkeit und der Elastizitätsmodul von Buche mit und ohne Rotkern geprüft (siehe Kapitel 4). Anschliessend wurde die Festigkeit der Verklebung von rotkernigem und nicht rotkernigem Buchenholz mit 3 verschiedenen Klebstoffsystemen getestet.

5.2 Material und Methoden

Das Probenmaterial stammte aus 4 rotkernigen Buchenstämmen (siehe Kapitel 2). Jeweils aus dem rotkernigen sowie dem benachbarten unverkernten Stammteil wurden zur Prüfung der Verklebungsqualität (mittlere Klebfestigkeit und Bruchbilder) Probenkörper nach EN 302-1 „Klebstoffe für tragende Bauteile; Prüfverfahren, Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit“^[34] angefertigt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden 3 Gruppen von Klebstoffen eingesetzt:

- Polyvinylacetat-Dispersion (Miracol 8F1 + 5% Härter 9V1) der Firma Geistlich Ligamenta, Schlieren, CH (im folgenden: PVAC)
- 1K Polyurethanklebstoff (Purbond HB 110) der Firma Collano, Sempach-Station, CH (im folgenden: PUR)
- Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (Kauramin Leim 681 mit Kauramin Härter 686 flüssig) der Firma türmerlein GmbH, Ludwigshafen, D (im folgenden: MUF)

Die von den Herstellern empfohlenen Verarbeitungshinweise wurden bei der Verklebung der Prüfkörper eingehalten (Tab. 5.1). Es wurden Prüfkörper mit dünnen Klebstoffugen hergestellt (0,1 mm). Vor der Zugscherprüfung erfolgte die Behandlung der Proben nach A4:

- 6 h in kochendem Wasser
- 2 h untergetaucht in Wasser bei 20 +/- 5°C
- Prüfkörper werden in feuchtem Zustand geprüft

Tab. 5.1: Verarbeitungshinweise

Klebstoff	Klebstoffauftrag	Presstemperatur	Pressdruck	Pressdauer	Aushärungszeit
	g/m ²	°C	N/mm ²	Std.	Tage
PVAC	Pinself, beidseitig je 110	20	0.4	> 2	7
PUR	Pinself, beidseitig je 150	20	0.7	> 4	7
MUF	Pinself, beidseitig je 200	20	1.2	> 11	7

Zur Ermittlung der Längszugscherfestigkeit der verklebten Proben kam eine Zugprüfmaschine der Firma Zwick (Z010/TH2A) zum Einsatz (Abb. 5.1). Nach der Prüfung wurde der prozentuale Anteil an Holzausriss durch Sichtprüfung auf 10 % geschätzt. Von den verklebten und nach A4 behandelten Proben wurden zur visuellen Charakterisierung der Klebefugen stichprobenmässige lichtmikroskopische Aufnahmen gemacht sowie die Leimfugendicke vermessen.



Abb. 5.1: Zugscherprüfung von Buche mit und Buche ohne Rotkern an der Zugprüfmaschine

5.3 Ergebnisse

Insbesondere Klebstoffe für die Herstellung tragender Bauteile wie BSH müssen feste und dauerhafte Verbindungen gewährleisten. In den folgenden Abschnitten sind die Längszugscherfestigkeiten der 3 verschiedenen Klebstoffsysteme pro Baum und Variante mit Rotkern und ohne Rotkern angegeben. Im Anhang 2 sind sämtliche Messwerte in tabellarischer Form zu finden.

Der Vergleich der Festigkeiten der verschiedenen Klebstoffsysteme zeigt, dass die mit MUF verklebten Proben die höchsten und die mit PVAC die geringsten Werte aufweisen (Abb. 5.2). Im Vergleich der Festigkeiten von Buche mit und ohne Rotkern ist ersichtlich, dass die rotkernigen Proben im Mittel höhere Festigkeiten aufweisen als nicht rotkernige Proben; bei dem Klebstoffsystem MUF ist der Unterschied nicht signifikant, bei PUR und PVAC signifikant. Die Ergebnisse sind in der Tab. 5.2 zusammengefasst.

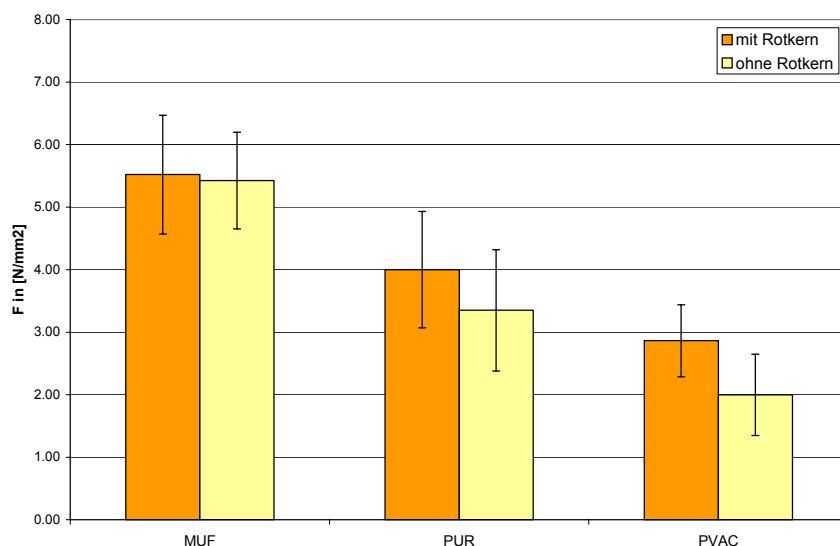


Abb. 5.2: Vergleich der mittleren Klebfestigkeiten von MUF, PUR und PVAC von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

Tab. 5.2: Längszugscherfestigkeiten sowie Holzfaseranteil in den Bruchflächen der geprüften Buchenholzproben (Mittelwerte mit Standardabweichungen in Klammern)

	Buche ohne Rotkern			Buche mit Rotkern	
	Lagerung	Längszugscherfestigkeit [N/mm ²]	Faseranteil [%]	Längszugscherfestigkeit [N/mm ²]	Faseranteil [%]
PVAC	A1	-	-	-	-
	A4	2.00 (0.65)	0	2.86 (0.58)	0
PUR	A1	12.80 (1.03)	90	12.27 (1.09)	80
	A4	3.35 (0.97)	0	4.00 (0.93)	0
MUF	A1	10.60 (1.63)	100	12.36 (1.50)	100
	A4	5.42 (0.77)	80	5.52 (0.95)	60

5.3.1 PVAC

Der für die vergleichenden Untersuchungen verwendete Dispersionsklebstoff ist nach EN 204 „Klassifizierung von thermoplastischen Holzklebstoffen für nicht tragende Anwendungen“ als D3 / D4 eingestuft, d.h. für die Verwendung in Einsatzgebieten mit höherer Feuchte geeignet. Beim Vergleich der mit PVAC verklebten Buchenproben mit und ohne Rotkern mit PVAC zeigen die Proben mit Rotkern bei allen untersuchten 4 Bäumen signifikant höhere Festigkeitswerte (Abb. 5.3). Die ermittelten Festigkeiten der Proben mit Rotkern betragen zwischen 2.45 und 3.21 N/mm², die der Proben ohne Rotkern zwischen 1.18 und 2.40 N/mm².

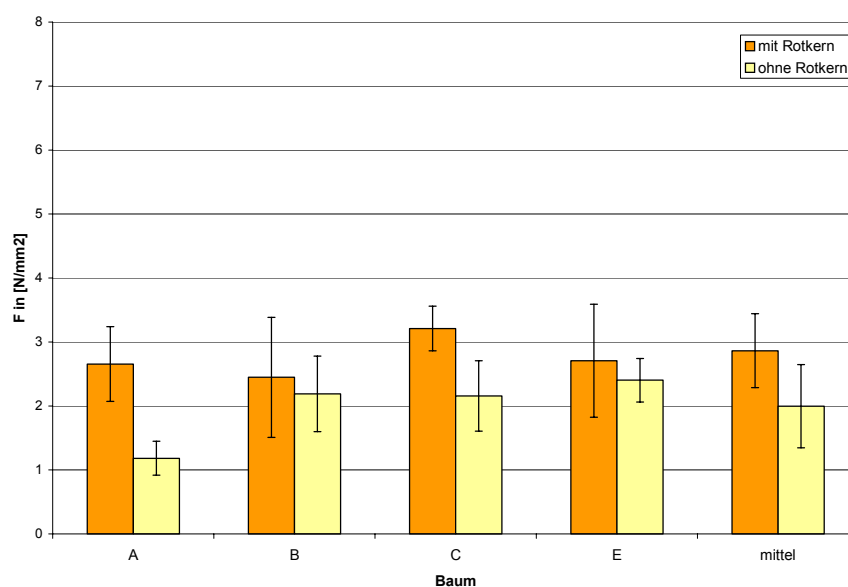


Abb. 5.3: Längszugscherfestigkeit für Buchenholz mit und ohne Rotkern nach Lagerung A4: Klebstoff PVAC (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

An den Bruchflächen kann kein Faserausriss festgestellt werden, d. h. der Bruch hat bei den Proben nicht in der Holzstruktur, sondern innerhalb der Klebfugen stattgefunden.

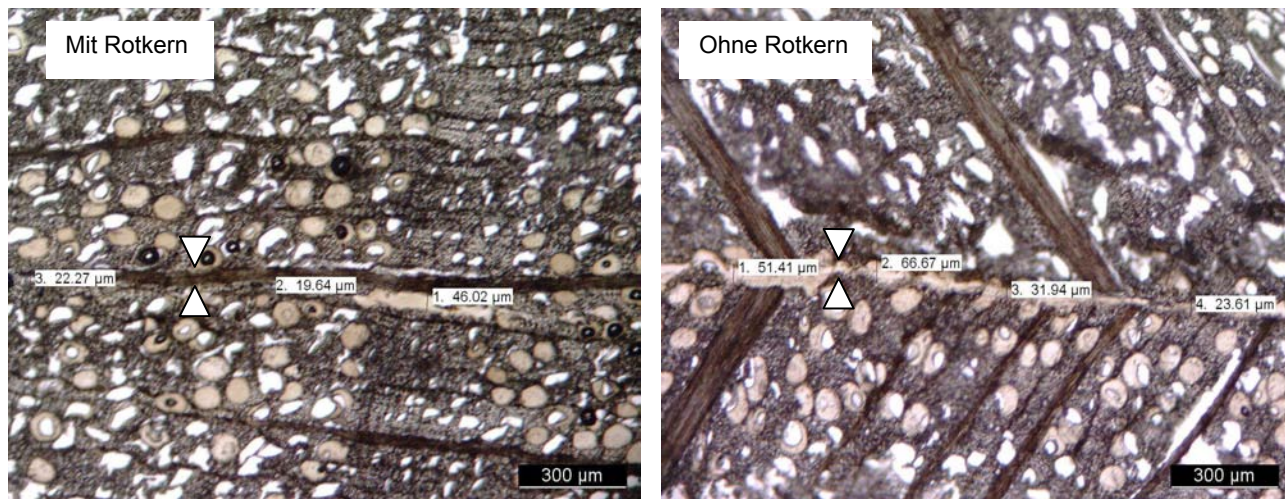


Abb. 5.4: Querschnitt durch mit PVAC verklebte und nach A4 gelagerte Probekörper. Die Lumina der Frühholzgefäße sind mit (hellbraunem) Klebstoff gefüllt. (lichtmikroskopische Aufnahme)

In der Abb. 5.4 sind mikroskopische Aufnahmen der Querschnitte der mit PVAC verklebten Probekörper nach der A4- Lagerung dargestellt. Die Klebstofffuge der Probe mit Rotkern hat eine Dicke zwischen 19 und 46 µm, die der Probe ohne Rotkern ist zwischen 23 und 66 µm dick. Im Frühholz der Probe mit Rotkern ist zu erkennen, dass der PVAC-Klebstoff tief in die Gefäße eingedrungen ist (hellbraune Bereiche innerhalb der Lumina), im Spätholz hingegen befindet sich der Klebstoff innerhalb der Fuge.

5.3.2 PUR

Beim Vergleich des mit PUR verklebten Holzes der Bäume B, C und E zeigen die Buchenholz-Proben mit Rotkern im Mittel signifikant höhere Festigkeitswerte (Abb. 5.5) als die Proben ohne Rotkern. Ausnahmen finden sich bei Baum A, dessen Proben ohne Rotkern eine leicht erhöhte Längszugscherfestigkeit aufweisen. Die ermittelten Festigkeiten der rotkernigen Proben betragen zwischen 3.52 und 4.96 N/mm², die der nicht rotkernigen zwischen 2.24 und 4.00 N/mm².

Der prozentuale Faseranteil in der Bruchfläche der mit PUR behandelten Proben ist sowohl bei den Proben mit als auch bei den Proben ohne Rotkern gleich 0. Der Bruch erfolgt immer innerhalb der Klebstofffuge.

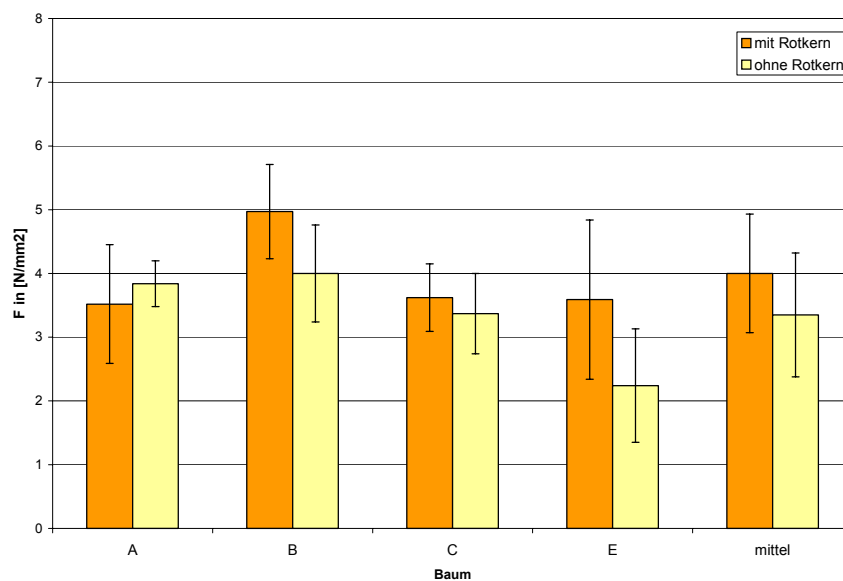


Abb. 5.5: Längszugscherfestigkeit für Buchenholz mit und ohne Rotkern nach Lagerung A4: Klebstoff PUR (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

In der Abb. 5.6 sind Querschnitte der mit PUR verleimten Probekörper nach der A4 Lagerung dargestellt. Die Klebstofffuge der Probe mit Rotkern hat eine Dicke zwischen 25 und 123 μm , die Klebstofffuge der nicht rotkernigen Probe ist zwischen 55 und 68 μm dick. Im Vergleich zu den mit PVAC verleimten Proben ist bei dieser Klebstoffart nicht sehr viel Klebstoff in die Lumina der Gefäße eingedrungen, weder beim rotkernigen, noch beim nicht rotkernigen Holz. Hier ist der Klebstoff grösstenteils innerhalb der Klebstofffuge verblieben. Dies bestätigen auch die makroskopischen Untersuchungen der Klebstofffugen, in denen nach der Zugscherfestigkeitsprüfung der PUR schuppig an der Klebstofffuge anliegt.

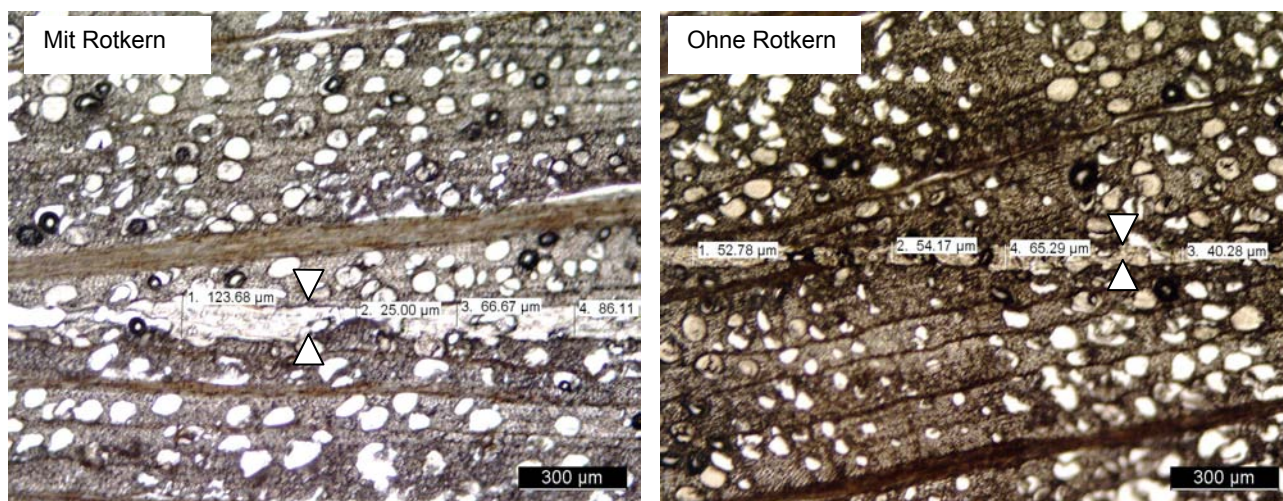


Abb. 5.6: Querschnitt durch mit PUR verklebte und nach A4 gelagerte Probekörper (lichtmikroskopische Aufnahme)

5.3.3 MUF

Die mit MUF verleimten Proben weisen die höchsten Festigkeitswerte im Vergleich zu den anderen Klebstoffen PUR und PVAC auf. Beim Vergleich der Längszugscherfestigkeiten von Buchenholz-Proben der Bäume A, B, C und E ohne und mit Rotkern zeigten im Mittel die rotkernigen Proben keine signifikant höheren Festigkeitswerte (Abb. 5.7). Die ermittelten Festigkeiten der Proben mit Rotkern betragen zwischen 5.24 und 6.44 N/mm², die der Proben ohne Rotkern zwischen 4.87 und 5.95 N/mm². Ausnahme ist hier der Baum B, bei dem die Proben ohne Rotkern eine signifikant höhere Festigkeit aufweisen. Dies kann die Folge von verkrümmten Probenkörpern des rotkernigen Holzes des Baumes B sein. Werden die Werte des Baumes B, bei dem die Proben ohne Rotkern signifikant höhere Festigkeiten aufweisen, nicht in die Gesamtrechnung aufgenommen, so zeigen auch bei MUF die Proben mit Rotkern der Bäume A, C und E signifikant höhere Festigkeitswerte.

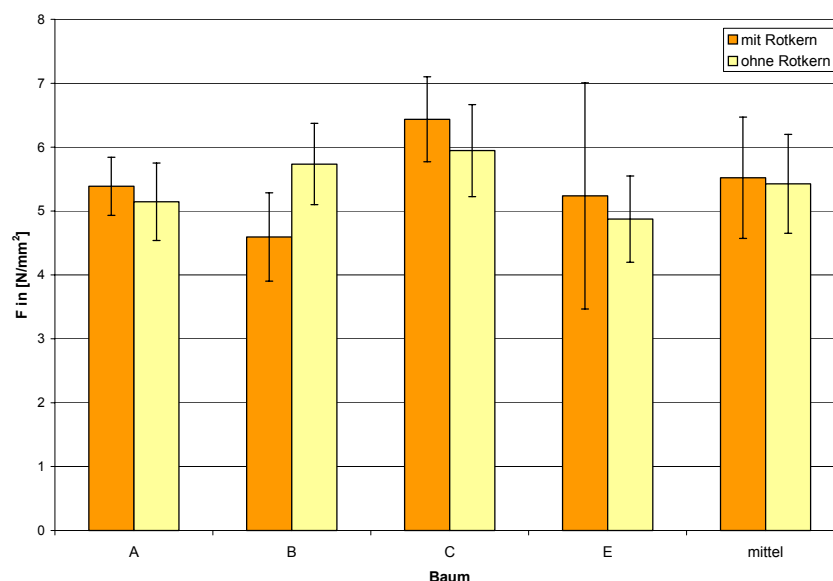


Abb. 5.7: Längszugscherfestigkeit für Buchenholz mit und ohne Rotkern nach Lagerung A4: Klebstoff MUF (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

An der Bruchfläche der mit MUF behandelten Proben ist der Faserausriss insgesamt sehr hoch (Abb. 5.8). Es handelt sich um einen Bruch im Holz, selten um ein Versagen innerhalb der Klebstoffuge. Zudem ist erkennbar, dass die Proben ohne Rotkern im Mittel einen signifikant höheren Faserbruchanteil aufweisen als die Proben mit Rotkern. Die hohe Streuung bei den Proben ohne Rotkern des Baumes E und den Proben mit Rotkern des Baumes B erklärt sich daraus, dass die Proben nach der Lagerung nach A4 gekrümmt oder verdreht waren.

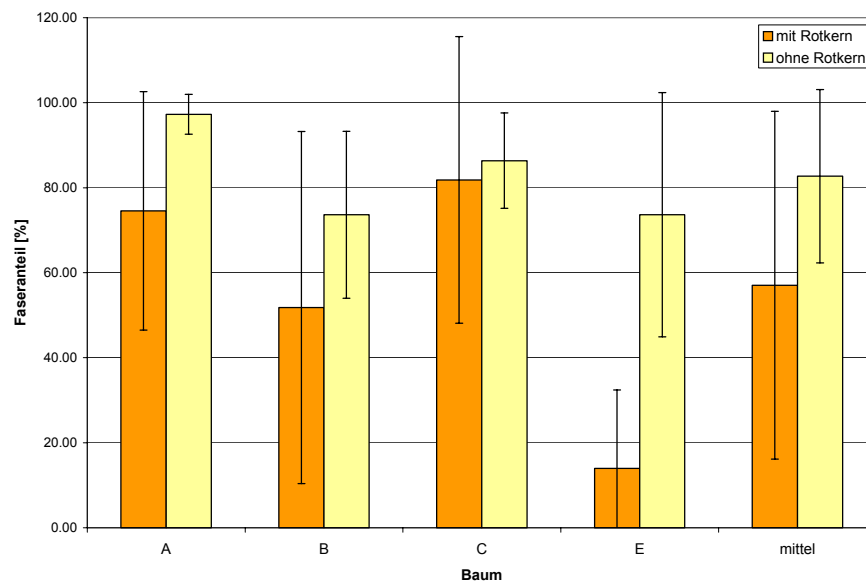


Abb. 5.8: Prozentualer Faseranteil in der Bruchfläche von mit MUF verklebten Buchenholzproben mit und ohne Rotkern (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

In der Abb. 5.9 sind Querschnitte der mit MUF verklebten Probekörper nach der A4 Lagerung dargestellt. Die Klebstofffuge der Probe mit Rotkern hat eine Dicke zwischen 19 und 75 μm , die Klebstofffuge der Probe ohne Rotkern ist zwischen 58 und 83 μm dick.

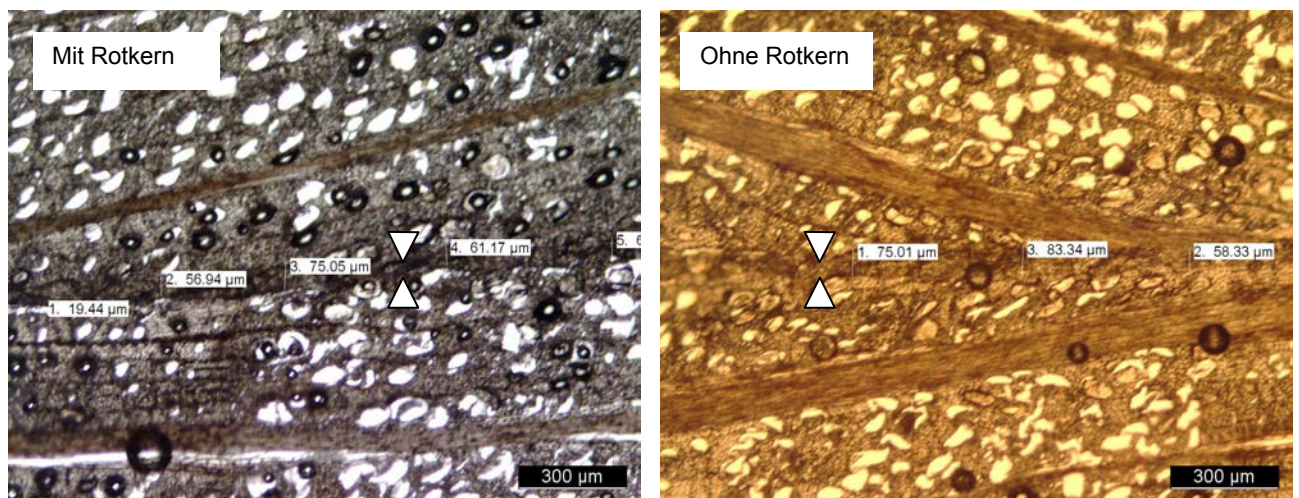


Abb. 5.9: Querschnitt durch mit MUF verklebte und nach A4 gelagerte Probekörper (lichtmikroskopische Aufnahme)

5.4 Diskussion

Die hier durchgeführten Untersuchungen lassen orientierende Aussagen zur Qualität der Verklebung von Buchenholz ohne Rotkern im Vergleich zu Buchenholz mit Rotkern zu. Die Verklebungsqualität wird generell durch verschiedene Faktoren wie Festigkeit und Elastizität des Klebstoffes, aber auch durch die Beschaffenheit des Holzes beeinflusst. Beim Holz spielen zudem Vorbehandlungen wie Dämpfen, Oberflächenbehandlungen wie Hobeln und Schleifen eine wesentliche Rolle. Von diesen Einflussfaktoren wurden im Projekt

- die Eigenschaften des Klebstoffes durch die Wahl verschiedener Systeme, sowie
- die Beschaffenheit des Holzes durch die Wahl von Buchenholz mit und ohne Rotkern variiert und untersucht.

5.4.1 Einfluss der Klebstoffsysteme auf die Längszugscherfestigkeit

Die Zugscherfestigkeiten der hier verwendeten Klebstoff-Systeme nehmen in der Reihenfolge MUF, PUR PVAC ab. Dieser Trend ist bekannt. Bei den Anforderungen an Klebstoffe, die der EN 301 „Klebstoffe für tragende Bauteile, Phenoplaste und Aminoplaste, Klassifizierung und Leistungsanforderungen“ ^[35] entsprechen, beträgt der Mindestwert der mittleren Längszugscherfestigkeit für dünne Klebstoffugen an Prüfkörpern aus Buchenholz bei einer A4-Behandlung 6.0 N/mm^2 . In den hier durchgeführten Versuchen lagen die Mittelwerte des Aminoplastklebers MUF für Buchenholz ohne Rotkern bei 5.42 N/mm^2 , bei Holz mit Rotkern bei 5.52 N/mm^2 . Für PVAC (D4-Klebstoff) gelten laut EN 204 „Klassifizierung von thermoplastischen Holzklebstoffen für nichttragende Anwendungen“ ^[36] Mindestwerte der Klebfestigkeit dünner Klebstoffugen in der Beanspruchungsgruppe D4 bei einer Lagerungsfolge 5, die bei $\geq 4 \text{ N/mm}^2$ liegen. Auch diese Mindestwerte wurden nicht erreicht (Ohne Rotkern: 2.00 N/mm^2 , mit Rotkern: 2.86 N/mm^2). Für PUR-Klebstoffe gibt es, da die Norm EN 301 nur für Kondensationsklebstoffe konzipiert ist, hinsichtlich Mindestwerte der Verklebung keine Vorgaben. Es wird jedoch im Rahmen erfolgter Zulassungen von denselben Anforderungen ausgegangen wie für Kondensations-Klebstoffe.

Nachfolgeuntersuchungen sollten zeigen, ob die Ursachen für die nicht erreichten Mindestwerte der Längszugscherfestigkeiten in den verwendeten Klebstoffen oder in der verschärften Behandlungsfolge (A4) liegen. Entsprechend der EN 302-1 „Klebstoffe für tragende Bauteile; Prüfverfahren, Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit“ ^[34] wurden nochmals Probekörper aus Buchenholz mit und ohne Rotkern hergestellt und diese dann vor der Zugscherprüfung ei-

ner Behandlung der Proben nach A1 unterzogen (Prüfung direkt nach der 7-Tage Lagerung im Normalklima (20°C/65% Luftfeuchtigkeit)).

Für diese Prüfungen wurden die Klebstoffe MUF und PUR eingesetzt. Der für die vergleichenden Untersuchungen verwendete Dispersionsklebstoff PVAC wurde nicht mehr eingesetzt, da dieser ein Holzklebstoff ist, der lediglich für den nicht tragenden Bereich zugelassen ist. Diese vorliegenden Untersuchungen sollten aber die Klebstoffe für tragende Bauteile beinhalten.

Die Abbildungen Abb. 5.10 und Abb. 5.11 zeigen, dass die geforderten Mindestwerte nach EN 301 ^[35] bei dem Klebstoff PUR erreicht wurden. Der Mindestwert der mittleren Längszugscherfestigkeit für dünne Klebstoffugen an Prüfkörpern aus Buchenholz bei einer A1-Behandlung ist 10.0 N/mm². Bei den mit PUR verklebten Proben liegt die Längszugscherfestigkeit im Mittel über die Bäume A, B und E bei den Proben mit Rotkern bei 12.27 N/mm² (Standardabweichung 1.09), bei den Proben ohne Rotkern sogar bei 12.80 N/mm² (Standardabweichung 1.03).

Die mit MUF verklebten Proben erreichen im Mittel die Mindestwerte 10.0 N/mm² nach der EN 301. Die Proben mit Rotkern haben eine Längszugscherfestigkeit von 12.36 N/mm² (Standardabweichung 1.50) erreicht und liegen demnach über dem Mindestwert, die Proben ohne Rotkern haben im Mittel eine Längszugscherfestigkeit von 10.6 N/mm² bei einer Standardabweichung von 1.63.

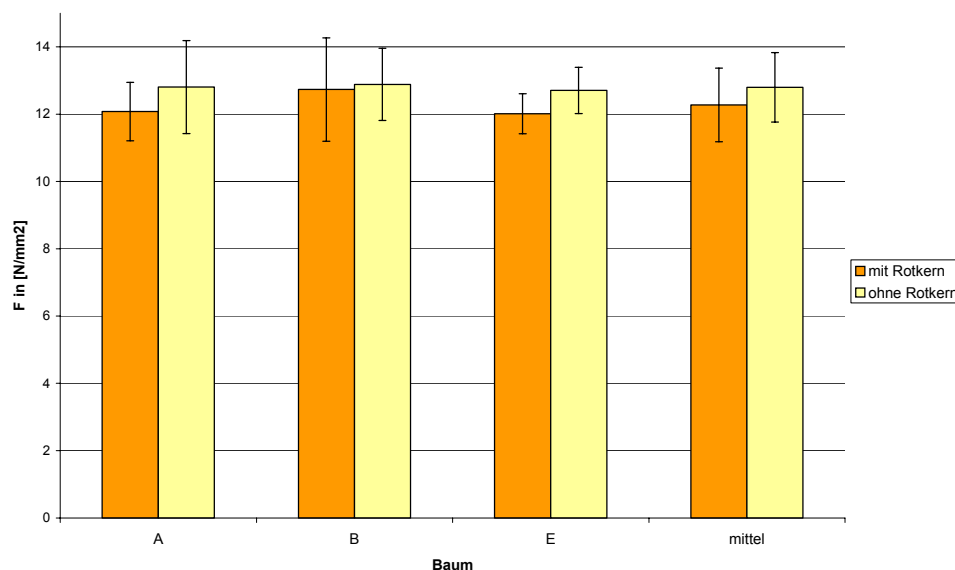


Abb. 5.10: Längszugscherfestigkeit für Buchenholz mit und ohne Rotkern nach Lagerung A1: PUR
(Mittelwerte mit Standardabweichungen)

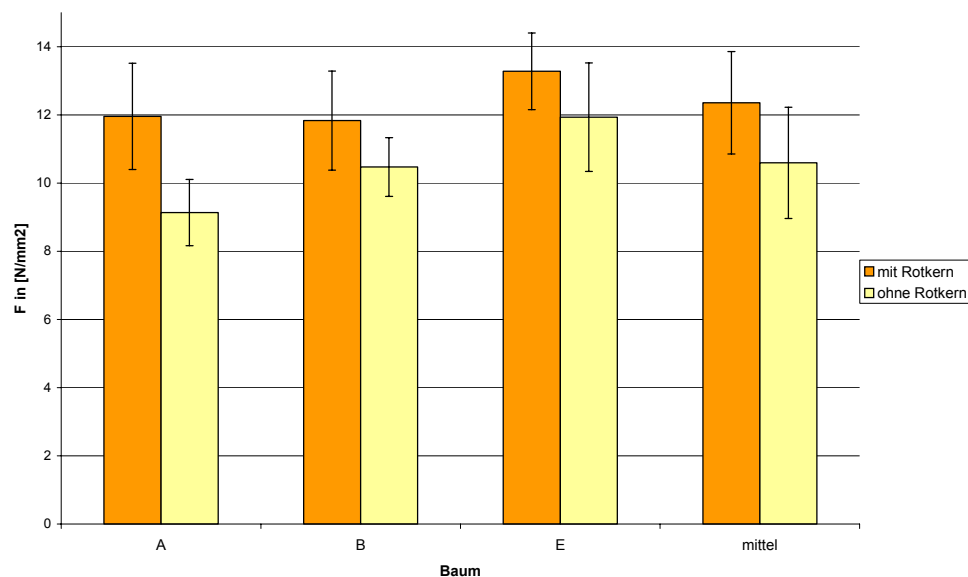


Abb. 5.11: Längszugscherfestigkeit für Buchenholz mit und ohne Rotkern nach Lagerung A1: MUF
(Mittelwerte mit Standardabweichungen)

Untersuchungen des Bruchbildes der mit MUF und PUR verklebten Proben nach der **A1-Lagerung** zeigen, dass der Faseranteil in der Bruchfläche der mit PUR verklebten rotkernigen Proben im Mittel bei 80% liegt (Abb. 5.13), bei den Proben ohne Rotkern bei 90%. Die mit MUF verklebten Proben zeigten alle einen Faseranteil von 100%. Lichtmikroskopische Bilder zeigen ein hohes Eindringverhalten des PUR-Klebstoffes in die Holzstruktur, jedoch auch eine grosse Blasenbildung innerhalb der Klebstoffuge. Lichtmikroskopische Aufnahmen der mit MUF verklebten Proben zeigen dieses tiefe Eindringverhalten nicht, die Klebstoffuge ist dafür gleichmässiger verteilt (Abb. 5.12).

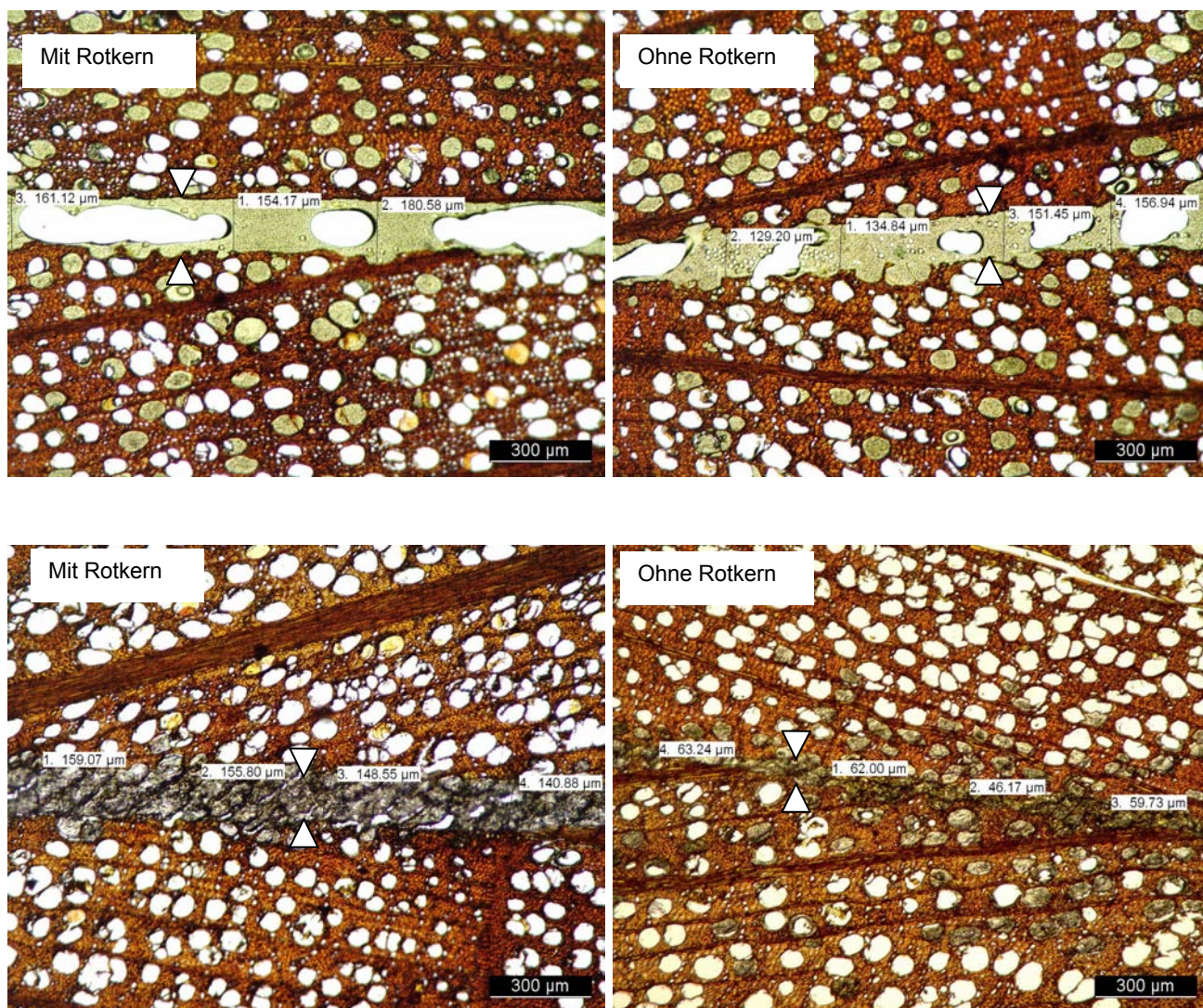


Abb. 5.12: Oben: Querschnitte durch mit PUR verklebte und nach A1 gelagerte Probekörper; sehr gute Eindringung des PUR-Klebstoffes in die Gefäße; unten: Querschnitt durch mit MUF verklebte und nach A1 gelagerte Probekörper (lichtmikroskopische Aufnahme)

Der Vergleich der Faseranteile in der Bruchfläche von mit PVAC, PUR und MUF verleimten Proben nach der **A4-Lagerung** zeigt, dass es nur bei den mit MUF behandelten Proben einen Faserausriss gab, bei PVAC und PUR hingegen war im Bruchbild kein Faseranteil festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass die Verleimung mit MUF bei Feuchteinfluss eine relativ hohe Qualität besitzt (Fugenfestigkeit liegt über der Festigkeit von Holz), die Verleimung mit PVAC und PUR jedoch nicht die geforderte Verleibungsqualität bietet.

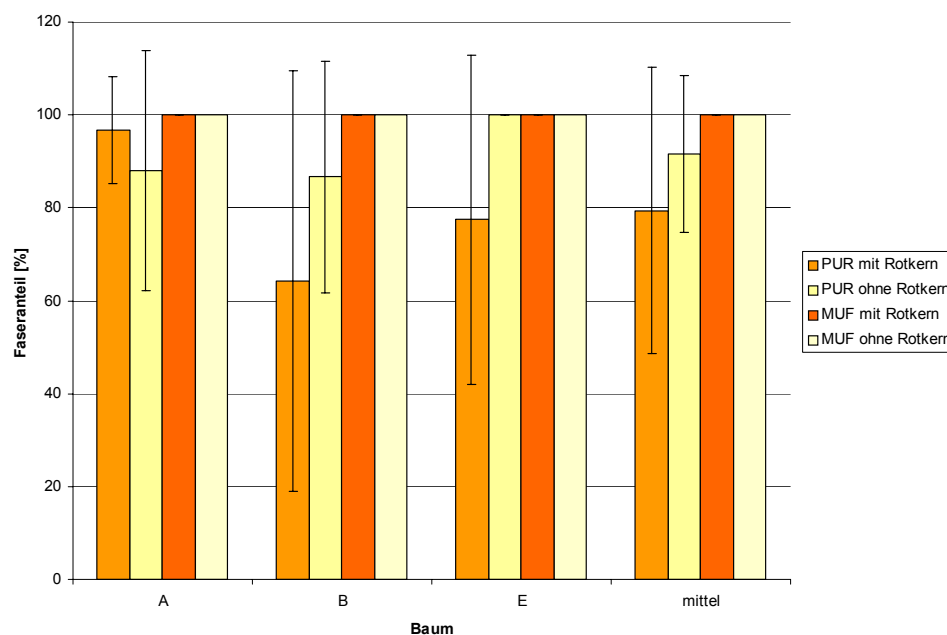


Abb. 5.13: Prozentualer Faseranteil in den Bruchflächen von mit PUR und MUF verklebten Buchenholzproben mit und ohne Rotkern (Mittelwerte mit Standardabweichungen)

Die Ergebnisse aller Untersuchungen an Klebstoffverbindungen mit PUR und MUF zeigen, dass

- die Klebstoffsysteme MUF und PUR die vorgegebenen Mindestwerte der A4-Lagerung nicht erreichen
- die mit MUF verklebten Proben höhere Längszugscherfestigkeiten nach einer A4-Lagerung erreichen als die mit PUR verklebten
- die mit PUR verklebten Proben nach einer A1-Lagerung höhere Längszugscherfestigkeiten aufweisen als die mit MUF verklebten
- der Bruch bei den mit PUR verklebten Proben nach einer A1-Lagerung z.T. hauptsächlich innerhalb der Holzstruktur erfolgt, bei einer A4-Lagerung jedoch zu 100% in der Klebstofffuge
- der Bruch bei den mit MUF verklebten Proben bei einer A1-Lagerung zu 100% innerhalb der Holzstruktur stattfindet, bei einer A4-Lagerung zu 30% in der Klebstofffuge

5.4.2 Einfluss des Rotkerns auf die Längszugscherfestigkeit

Bei der rotkernigen Buche stellte sich zu Beginn der Versuche die Frage, ob die den Rotkern verursachenden phenolischen Inhaltsstoffe die Verklebung negativ beeinflussen könnten. Bei zusammenfassender Betrachtung der Ergebnisse der Untersuchungen nach der **A4-Lagerung**

zeigt sich jedoch, dass gerade die mit PVAC und PUR behandelten rotkernigen Proben signifikant höhere Zugscherfestigkeiten aufweisen als die nicht rotkernigen Proben. Bei den mit MUF behandelten Proben ist der Unterschied der Festigkeiten bei den Proben mit Rotkern ebenfalls höher, jedoch nicht signifikant.

Vergleicht man die Längszugscherfestigkeiten von Proben mit Rotkern und ohne Rotkern nach der **A1-Lagerung**, so zeigen die Proben mit Rotkern bei der Klebstoffvariante MUF signifikant höhere Werte. Diese erhöhten Festigkeiten könnten auf die im Mittel höhere Rohdichte des rotkernigen Holzes zurückzuführen sein (siehe Kapitel 4.1.2). Bei PUR sind die Werte von rotkernigen und nicht rotkernigen Proben vergleichbar.

Vergleicht man den Faseranteil in der Bruchfläche von rotkernigem und nicht rotkernigem Holz, so zeigen sich folgende Tendenzen:

- A4-Lagerung, PVAC und PUR: Bruch nur innerhalb der Klebstofffuge bei rotkernigen und nicht rotkernigen Proben
- A4-Lagerung, MUF: die nicht rotkernigen Proben weisen im Mittel einen signifikant höheren Faserbruchanteil auf als die rotkernigen Proben
- A1-Lagerung, PUR: die nicht rotkernigen Proben zeigen im Mittel einen höheren aber nicht signifikanten Faserbruchanteil als die rotkernigen Proben
- A1-Lagerung, MUF: die rotkernigen und nichtrotkernigen Proben weisen einen Faserbruchanteil von 100% auf

Werden alle Ergebnisse zum Vergleich der Festigkeiten der Klebstofffugen von Buchenholz ohne und mit Rotkern zusammengefasst, so ist das rotkernige Holz dem nicht rotkernigem ebenbürtig. Betrachtet man die Zugscherfestigkeiten der beiden Varianten, so zeigt die rotkernige Buche sogar z.T. signifikant höhere Festigkeiten.

6 Umfrage zum Vorkommen von rotkernigem Buchenholz in der Schweiz

6.1 Absicht / Einleitung

Betrachtet man das Verbreitungsgebiet der Buche in der Schweiz, so ist sie die in der kollinen bis unteren montanen Stufe die häufigste vorkommende Baumart ^[1]. Die Buche steigt in der Schweiz selten über 1400 m und hat den Schwerpunkt der Vertikalverbreitung bei 780 m ü.M.^[37].

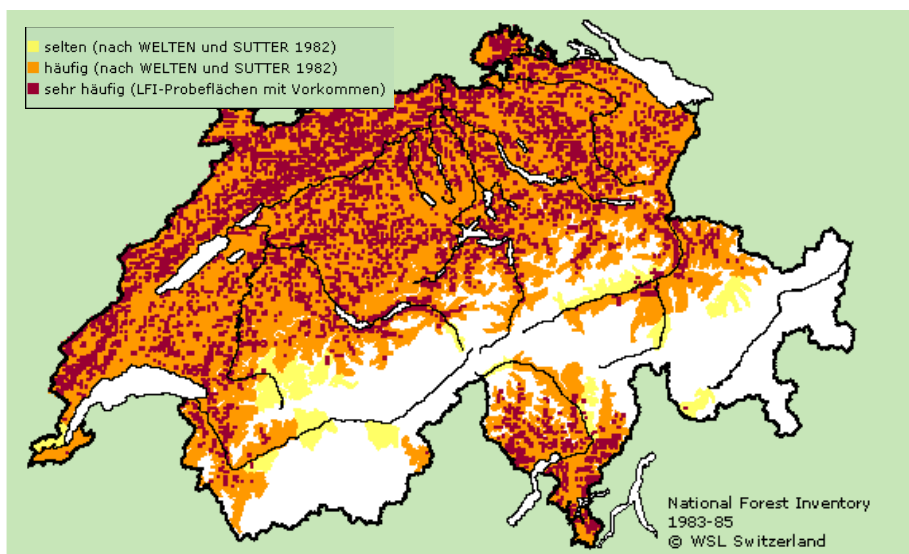


Abb. 6.1 Verbreitung der Buche in der Schweiz (nach Brändli)^[1]

Mit einem Stammzahlanteil von 19% ist die Buche nach der Fichte die zweithäufigste Baumart der Schweiz. Im Jura nimmt sie einen Anteil von 34% an der gesamten Stammzahl ein, im Mittelland sind es 24%, in den Voralpen 17%, in den Alpen 9% und auf der Alpensüdseite 19%. Der Holzvorrat von Buche in der Schweiz beträgt etwa 59.2 Mio m³, wovon jährlich im Durchschnitt 1.15 Mio m³ geerntet werden.

Für eine Massenverwendung von Buche mit Rotkern für die industrielle Verarbeitung wäre eine kontinuierliche und zuverlässige Bereitstellung dieses Holzes erforderlich. Dafür sind Daten über das Aufkommen rotkerniger Buche notwendig. In der Schweiz gibt es jedoch keine offizielle Statistik über rotkerniges Buchenholz. Aufgrund dessen sollte in diesem Projekt eine Umfrage zu diesem Thema durchgeführt werden.

6.2 Umfrage

Die vor Projektbeginn im Sommer 2002 durchgeführte Umfrage bei Schweizer Kreisforstämtern, Waldabteilungen etc. über das Vorkommen von Rotkern wurde ausgewertet und die daraus gewonnenen Ergebnisse flossen in die detaillierte Umfrage innerhalb dieses Projektes ein (Anhang 2).

Da der Aufwand für eine gesamtschweizerische Umfrage innerhalb dieses Projektes zu gross gewesen wäre, sollte eine stichprobenmässige Umfrage bei den Kantonsforstämtern orientierende Zahlen liefern. Der Umfragebogen sowie ein kurzer Projektbescrieb wurde über die Kantonsoberrörster an die jeweiligen Betriebsleiter, Förster oder Kreisförster weitergeleitet.

Da der Umfragebogen innerhalb des Kantonsforstamtes weitergeleitet worden ist, kann über die tatsächliche Rücklaufquote keine Aussage gemacht werden.

6.2.1 Vorkommen Rotkern

Aus den Kantonen Nidwalden, Obwalden und Solothurn erhielten wir eine Zusammenfassung der beantworteten Fragebogen (ganzer Kanton). Aus den anderen Kantonen wurden z.T. einzelne Antworten rückgesendet oder es erfolgte keine Antwort.

Die Anzahl der Rückantworten aus den Kantonen war sehr unterschiedlich. Der Rücklauf der Fragebogen aus den Kantonen Aargau (78), Jura (27), Nidwalden (ganzer Kanton), Obwalden (ganzer Kanton) und Solothurn (ganzer Kanton) schien ausreichend und auch statistisch auswertbar. Für die restlichen Kantone kann entweder nur eine orientierende Aussage über das Rotkernvorkommen gemacht werden (wenig Rücklauf) oder gar keine (kein Rücklauf).

Die Tab. 6.1 zeigt den aus den Fragebögen errechneten Mittelwert zum Einschlag und zur Nutzung von Buchen-Stammholz, -Industrieholz und -Brennholz aus den Jahren 1998-2002 der jeweiligen Kantone sowie den jeweiligen Anteil Rotkern. Zusätzlich wurde eine Auswertung ohne das Jahr 2000 durchgeführt, da diese Zahlen aufgrund der Auswirkungen des Orkans Lothar nicht repräsentativ schienen. Im Anhang 3 sind die ausführlichen Daten aufgeführt. Da es sich nur um eine stichprobenmässige Umfrage handelt und die erhaltenen Zahlen nicht dem tatsächlichen jährlichen Buchen-Einschlag und der Einteilung nach Stamm-, Industrie- und Brennholz entsprechen, können nur die Prozentangaben über den Anteil Rotkern für eine orientierende Interpretation herangezogen werden.

Tab. 6.1: Durchschnittlicher Einschlag und Nutzung von Buche in den Jahren 1998 – 2002 mit Angaben zum prozentualen Vorkommen von Rotkern sowie Anzahl der erhaltenen Rückmeldungen. In Klammern die Zahlen ohne die Angaben zum Jahr 2000 (Lothar)

Kanton	Stammholz		Industrieholz		Brennholz		Rückmeldungen
	1000 m ³ /Jahr	Rotkern %	1000 m ³ /Jahr	Rotkern %	1000 m ³ /Jahr	Rotkern %	Anzahl
AG	33 (29)	28 (29)	16 (15)	19 (18)	19 (18)	17 (17)	78
AI							keine
AR							keine
BE	25 (16)	55 (55)	1 (1)	45 (45)	5 (5)	38 (38)	15
BL/BS	17 (16)	46 (46)	5 (5)	26 (26)	8 (7)	28 (27)	14
FR							1
GE							keine
GL							3
GR							3
JU	30 (28)	50 (50)	14 (13)	38 (38)	5 (5)	36 (37)	27
LU							5
NE							keine
NW	3 (3)	80 (80)	0.3 (0.3)	50 (50)	6 (4)	50 (50)	ganzer Kanton ¹
OW	6 (5)	80 (80)	0.4 (0.4)	80 (80)	8 (7)	78 (78)	ganzer Kanton ¹
SG	5 (5)	62 (61)	0.4	-	7	46 (44)	10
SH							keine
SO	26 (27)	60 (60)	24 (24)	30 (30)	13 (13)	34 (34)	ganzer Kanton ¹
SZ	3 (3)	60 (58)	27 (27)	43 (43)	17 (17)	43 (43)	8
TG	6 (6)	35 (35)	1 (1)	-	5 (5)	33 (33)	14
TI							keine
UR							1
VD	14 (14)	29 (29)	3 (4)	29 (29)	15 (15)	33 (33)	10
VS							keine
ZG							keine
ZH							keine
Schweiz	176 (159)	40 (40)	74 (71)	27 (27)	104 (99)	28 (28)	

¹ Zusammenfassung über die gesammelten Zahlen innerhalb des Kanton

Bei der Interpretation der Zahlen zum Buchen-Stammholz zeigt sich, dass der prozentuale Rotkernanteil in den einzelnen Kantonen zwischen 30% und 80% schwankt. Der durchschnittliche Anteil Rotkern beträgt 40%. Beim Industrieholz ist zwischen ca. 20% und 80% und beim Brennholz 20% und 80% rotkernig. Die Kantone Nidwalden und Obwalden melden den höchsten durchschnittlichen Rotkernanteil im Buchenstammholz mit 80%. Die Kantone Aargau und Waadt haben den geringsten Rotkernanteil mit ca. 30 %. Die Auswirkungen des Orkans Lothar zeigten Einfluss auf die erhaltenen Mengen des Einschlages, nicht jedoch auf den Anteil Rotkern.

Die Tab. 6.2 zeigt, dass der durchschnittliche Anteil von Rotkern über alle erfragten Jahre hinweg relativ konstant ist, sowohl beim Stamm-, Industrie- und Brennholz.

Tab. 6.2 Zusammenfassung der Umfrage für die gesamte Schweiz (1998 – 2002)

Jahre	1998	1999	2000	2001	2002
Einschlag BU-Stammholz m³	165322	172001	243459	160105	139871
davon Rotkern %	40	40	40	39	40
Menge Industrieholz m³	68015	76646	80608	75871	66374
davon Rotkern %	25	27	28	28	27
Menge Brennholz m³	92409	94782	123018	107449	100291
davon Rotkern %	27	28	28	28	28

6.2.2 Preise von nicht rotkernigem im Vergleich zu rotkernigem Buchenholz

Laut Holzmarktbericht des Waldwirtschaftsverbandes Schweiz (WVS) ^[38] gibt die Entwicklung auf dem Laubholzmarkt Anlass zu Besorgnis. Durch Produktionsverlagerungen nach Osteuropa und in den asiatischen Raum gehen immer mehr Marktanteile verloren, insbesondere im Möbelbereich. Der Markt für Buche ist nach wie vor flau und ohne nennenswerte Anzeichen auf einen Aufschwung. Auch der Verband Holzindustrie Schweiz beschreibt den Laubholzmarkt als problematisch ^[39]. Die Buche verharre mengen- und preismässig auf tiefem bis sehr tiefem Niveau. Absatz fänden nur noch Spitzensortimente. In der Tabelle Tab. 6.3 sind die von der Holzindustrie Schweiz herausgegebenen Rundholzrichtpreise für Buchenholz aufgeführt.

Durch die Umfrage sollte ermittelt werden, wie die Preise zwischen Buchenholz ohne und mit Rotkern in den verschiedenen Produktgruppen Stamm-, Industrie- und Brennholz variieren.

Tab. 6.3 Rundholzrichtpreise 2003/2004 von Holzindustrie Schweiz für Buche (Fr. je m³, in Rinde ab Waldstrasse) ^[40]

Buche	A	B	C
Kl. 3a	-	-	40-50
Kl. 3b	-	110	40-50
Kl. 4	190	150	40-60
Kl. 5	230	160	40-65
Kl. 6+	260	180	40-70

Tab. 6.4 und Abb. 6.2 zeigen die aus der Umfrage ermittelten, durchschnittlichen Preise für Buchenholz der verschiedenen Produktgruppen. Beim Vergleich der Angaben ist ersichtlich, dass die grössten preislichen Unterschiede hinsichtlich Rotkern beim Stammholz zu verzeichnen sind, der Rotkern bei Industrie- und Brennholz jedoch kaum einen preislichen Unterschied bewirkt.

Tab. 6.4 Durchschnittliche Preise für Buchenholz ohne (oRK) und mit Rotkern (mRK) der verschiedenen Produktgruppen (Min...Mittelwert...Max)

Nutzung	Stammholz oRK	Stammholz mRK	Industrieholz oRK	Industrieholz mRK	Brennholz oRK	Brennholz mRK
Preise	45... 140 ...250	35... 76 ...180	16... 37 ...72	12... 35 ...72	20... 64 ...113	20... 63 ...113

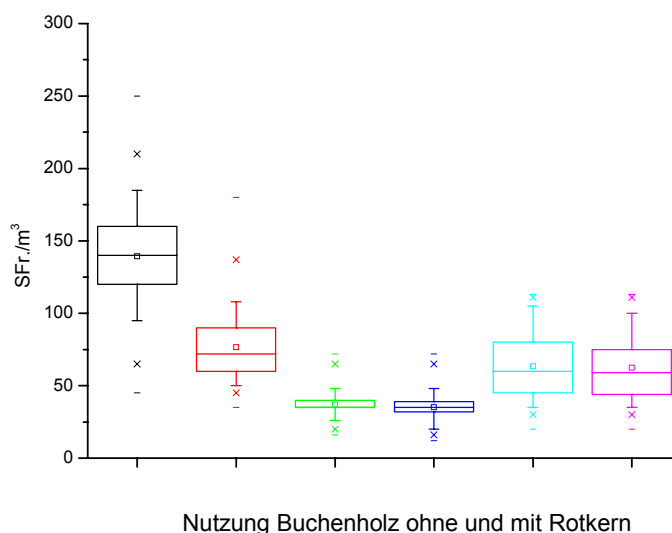


Abb. 6.2 Preise von Buchen-Stammholz ohne Rotkern (SToRK), Stammholz mit Rotkern (STmRK), -Industrieholz ohne Rotkern (IoRK), -Industrieholz mit Rotkern (ImRK), -Brennholz ohne Rotkern (BoRK) und -Brennholz mit Rotkern (BmRK), errechnet über alle Angaben der Kantone

Der mittlere Preis für nicht rotkerniges Stammholz beträgt 140 sFr./m³, er variiert aber zwischen 45 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Waadt) und 250 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Basel Land/Basel Stadt). Verglichen mit den Rundholzrichtpreisen der Holzindustrie Schweiz (Tab. 6.3) liegen diese Angaben innerhalb der erwarteten Preise der Qualitäten A, B und C. Stammholz mit Rotkern erreicht Werte zwischen 35 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Waadt) bis 180 sFr./m³ (Angabe aus dem Kanton Aargau), der mittlere Preis beträgt 76 sFr./m³. Hier zeigt sich der Rotkern doch stark als qualitätsminderndes Merkmal, erreicht man bei Stammholz mit Rotkern kaum mehr die Qualität B.

6.3 Diskussion

Die hier durchgeführte Umfrage gestaltete sich aus verschiedenen Gründen als sehr schwierig. Der Rücklauf der Fragebögen aus einigen Kantonen war sehr gering und auch die indirekte Verteilung der Fragebögen über die Kantonsoberröster erwies sich im Nachhinein als nicht optimal, da so die Rücklaufquote nicht mehr bestimmbar war. Weitere Kritikpunkte sind im Folgenden aufgeführt:

- Zeitpunkt der Umfrage: Die zuständigen Förster, Kreisförster etc. haben häufig darauf hingewiesen, dass die Zahlen über das Vorkommen von rotkerniger Buche nur grobe Schätzungen seien. Rückwirkend lassen sich aufgrund fehlender Statistiken konkrete Zahlen nicht mehr rekonstruieren.
- Sortierung: Es kann im Nachhinein von den Zuständigen nicht mehr festgestellt werden, ob die Qualitäten C,D und Schwellen (F und Schwellen bei der alten Sortierung) auf den Umstand der Rotkernigkeit oder auf andere Fehler zurückzuführen sind. Die Qualitäten C und D gibt es auch für nicht rotkerniges Buchenholz, während A- und B- Qualitäten durchaus auch etwas rotkernig sein können.
- Aufwand: Es wurde von mehreren Stellen bemängelt, dass der Aufwand zur Rekonstruktion der Zahlen über das Vorkommen von rotkerniger Buche zu hoch sei. Aufgrund dessen wurden die Fragebögen nicht in der gewünschten Anzahl ausgefüllt und zurückgesendet.

7 Ausblick

Die Buche ist eine Holzart, die sich für den Einsatz im Möbel- und Innenausbau sehr gut eignet. Aber gerade in diesen Bereichen sind die Einflüsse der Modetrends, der Gestaltung und der Ästhetik sehr ausgeprägt und kurzlebig. Das Buchenholz gilt heute als schön, sofern sie möglichst gleichmässig in Farbe und Struktur ist. Rotkernige Buche gilt als minderwertig und findet bisher hauptsächlich Verwendung im Industrie- und Brennholzbereich. Es ist jedoch bekannt, dass der Rotkern der Buche keine Beeinträchtigung der technologischen Eigenschaften zur Folge hat^[41]. Dies bestätigen auch die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen. Auch die Verleimungseigenschaften zeigen sich vergleichbar gut und z.T. besser bei der Buche mit Rotkern als jene beim Buchenholz ohne Rotkern, sind doch die Festigkeiten signifikant höher. Damit liegt der Schluss nahe, rotkerniges Buchenholz in Bereichen einzusetzen

- in denen Modetrends keinen Einfluss haben,
- wo Farbe und Struktur nicht als Gestaltungselement eingesetzt werden,
- in denen die guten technologischen Eigenschaften gefordert sind, und
- wo relevante Mengen abgesetzt werden können.

Ein Markt, der ein grosses Absatzpotential darstellt, ist das Bauwesen. Daher wurden im Rahmen dieser Untersuchungen verschiedene Parameter für den Einsatz von rotkerniger Buche als Brettschichtholz getestet. Diesem Bereich wird ein hohes Potential zugesprochen. Rotkernige Buche könnte hier Fichte teilweise substituieren. Bisher gibt es jedoch noch keine praxisreifen Produkte, aber entsprechende Forschungen sind für nicht rotkernige Buche angelaufen^[21] und sollten auf rotkerniges Buchenholz ausgedehnt werden.

Von den im Durchschnitt in der Schweiz anfallenden 1.15 Mio m³/Jahr Buche^[1] sind ca. 50% des Stammholzes rotkernig. Eine gezielte Nachfrage nach rotkerniger Buche findet zur Zeit nicht statt. Für die meisten Buchenstammholzverkäufer dürfte die rotkernige Buche ein nicht attraktives Produkt darstellen. Probleme beim Absatz rotkerniger Buche liegen in

- Unkenntnis über tatsächliches Vorkommen rotkerniger Buche in der Schweiz
- Fehlender Nachfrage Buchenholz beim Endverbraucher^[42]
- Mangelhafter Sortierung
- Aufwändige Sortierungsvorgänge aufgrund farblicher Inhomogenität für die Serienfertigung von Möbeln (bei BSH fällt dieses Kriterium weg)
- Keine Buchenholzprodukte im konstruktiven und damit mengenrelevanter Projekte

Für eine erfolgreiche Rotkern-Verwendungsoffensive sollten die folgenden Handlungsfelder benannt und bearbeitet werden:

- Im Bereich der dekorativen Verwendung von rotkernigem Buchenholz sind Fragen der automatisierten Farbsortierung zu klären und zu optimieren
- Im Bereich von rotkernigem Buchenholz als Konstruktionsholz sind Pilotprodukte wenn möglich mit hohen Aufnahmekapazitäten (z.B. Brettschichtholz) zu entwickeln und zu testen.
- Um genügend rotkerniges Buchenholz bei Bedarf liefern zu können, sollte in der Schweizer Forstwirtschaft eine offizielle Statistik über das Vorkommen erstellt und geführt werden.
- Und letztendlich sollte auch in der Schweiz eine Image-Kampagne für eine vermehrte Verwendung des rotkernigen Buchenholzes gestartet werden.

8 Literatur

- [1] U. B. Brändli, I. Heller-Kellenberger, **2002**,
<http://www.wsl.ch/land/products/lfi/resultate/buche1.ehtml>.
- [2] Anonymus, *Waldwirtschaft Verband Schweiz, Schweizerischer Sägerei- und Holzindustrieverband, Verband Schweizer Rund- und Schnittholzhändler* **2000**, 41.
- [3] H. Wobst, Dissertation thesis, Georg-August-Universität (Göttingen), **1969**.
- [4] J. Klebes, G. Mahler, B. Höwecke, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt, Freiburg, **1988**.
- [5] S. Molnar, Nemeth, R., Feher, S., Tolvaj, L., Papp, G., Varga, F., *Drevarsky Vyskum* **2001**, 46 (1), 21.
- [6] H. Sachsse, *Forstarchiv* **1991**, 63, 238.
- [7] J. Bauch, *IAWA Bulletin* **1984**, 5, 92.
- [8] G. Koch, Bauch, J., Puls, J., Welling, J., *AFZ/Der Wald* **2002**, 6, 315.
- [9] A. Naumann, *Holz Als Roh-Und Werkstoff* **1993**, 51, 422.
- [10] H. Zycha, *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **1948**, 67, 80.
- [11] H. H. Dietrichs, *BFH-Mitteilungen* **1964**, 58, 90.
- [12] H. Mehringer, J. Bauch, A. Fruhwald, *Holz Als Roh-Und Werkstoff* **1988**, 46, 447.
- [13] A. L. Shigo, H. G. Marx, *USDA Forest Serv. Agric. Information Bulletin* **1977**, 405.
- [14] O. Schmidt, H. Mehringer, *Holz Als Roh-Und Werkstoff* **1989**, 47, 285.
- [15] J. Bauch, *Holz-Zentralblatt* **1986**, 152, 2217.
- [16] K. J. M. Bensen, *Schweiz. Z. Forstwes.* **1991**, 142, 925.
- [17] F. Kollmann, R. Keylwerth, H. Kübler, *Holz als Roh- und Werkstoff* **1951**, 10, 382.
- [18] P. Kisseloff, *Schweiz. Z. Forstwes.* **1991**, 142 (5), 407.
- [19] G. Koch, Bauch, J., Puls, J., Schwab, E., Welling, J., *Holz-Zentralblatt* **2000**, 126 (6), 74.
- [20] R. Wagenführ, *Holzaltlas*, VEB Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, **1989**.
- [21] J. B. Ressel, *Holz-Zentralbl., Stuttgart* **2002**, 128 (107), S. 1269.
- [22] DIN5033, Beuth Verlag GmbH, **1992**.
- [23] DIN6174, **1979**.
- [24] ISO2808, **1997**.
- [25] DIN53387.
- [26] DIN52186, **1978**.
- [27] DIN52182, **1976**.
- [28] DIN52183, **1977**.
- [29] B. Kartusch, *Holzforschung und Verwertung* **1994**, 4, 66.
- [30] C. Klotzenburg, Dissertation thesis, Georg-August-University (Göttingen), **1966**.
- [31] T. Stübi, P. Niemz, *Holz-Zentralblatt* **2000**, 114, 1524.
- [32] S. Molnar, R. Nemeth, S. Feher, L. Tolvaj, G. Papp, F. Varga, T. Apostol, *Drevarsky Vyskum* **2001**, 46, 21.
- [33] DIN52184, **1979**.
- [34] EN302-1, **2001**.
- [35] EN301, **2001**.

- [36] EN204, **2001**.
- [37] U. B. Brändli, *Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf* **1996**.
- [38] Anonymus, **2003**, http://www.wald.ch/de/waldwirt/holzmarkt_d.html.
- [39] Anonymus, *Holzindustrie Schweiz* **2002**, 101.
- [40] Anonymus, *Schreiner-Zeitung* **2003**, 45, 48.
- [41] B. Gfeller, *Schweiz. Z. Forstwes.* **1998**, 149 (12), 943.
- [42] G. Becker, Seeling, U., Schüpbach, H., Ruf, J., http://www.psychologie.uni-freiburg.de/einrichtungen/Arbeits/ao_frameset.html **2000**.

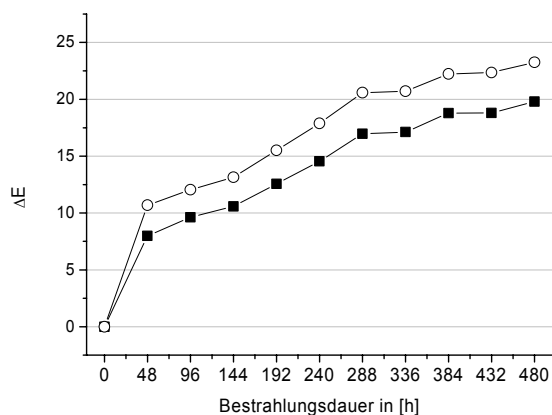
9 Anhang:

9.1 Anhang 1: Tafeln Oberflächenbehandlung 1. Serie und 2. Serie

Tafel 1:	1. Serie, System A: Unbehandelt
Tafel 2:	1. Serie, System B: Naturhartöl
Tafel 3:	1. Serie, System C: Naturhartwachs
Tafel 4:	1. Serie, System D: PUR/Acrylat/Copolymer wasserverdünnbar
Tafel 5:	1. Serie, System E: PUR/Acrylat/PE lösemittelhaltig
Tafel 6:	1. Serie, System F: Nitrocellulose / Alkydharz
Tafel 7:	1. Serie, System G: Acrylat wasserverdünnbar
Tafel 8:	2. Serie, System 1: Grundierung: Lignostab 1198 1-2%; Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1-2% Tinuvin 99-2
Tafel 9:	2. Serie, System 2: Grundierung: Lignostab 1198 1-2%; Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1% CGL 777 MPA
Tafel 10:	2. Serie, System 3: Lack: Reform Hydroflex 501 + 0.5-1%Hombitec RM 300 WP
Tafel 11:	2. Serie, System 4: Lack: Monodur Einkomponenten Lack
Tafel 12:	2. Serie, System 5: Lack: Reform Hydroflex 501 + 1-2% UVA Sanduvor disp. XP + 1% Hals sanduvor 3021-2 disp. X
Tafel 13:	2. SerieSystem 6: unbehandelt

Tafel 1

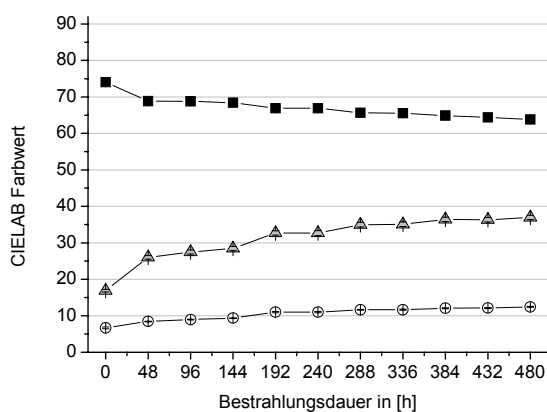
1. Serie, System A: Unbehandelt



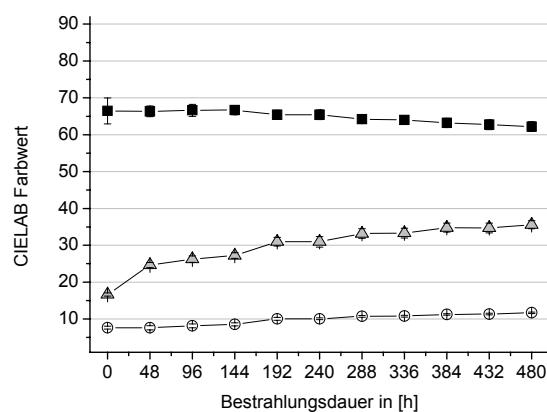
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System A, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

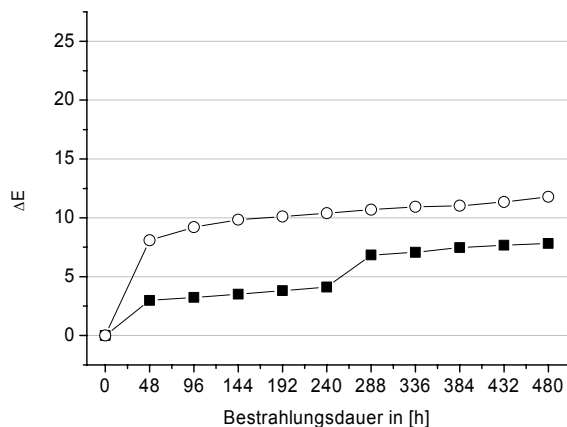


System A, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 2

1. Serie

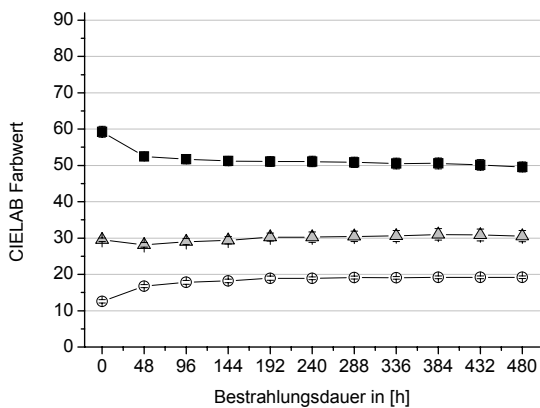
System B: Naturhartöl



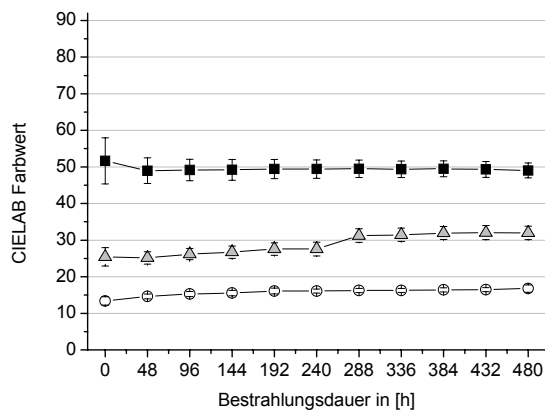
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System B, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

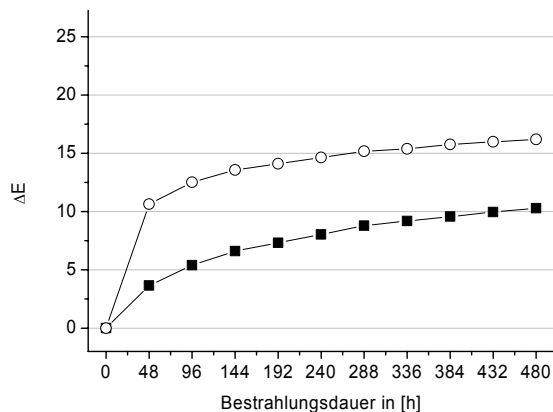


System B, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 3

1. Serie

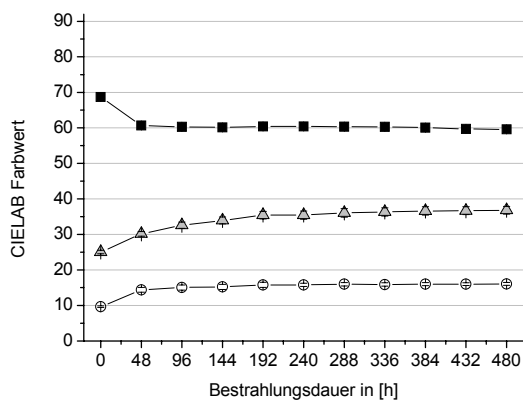
System C: Naturhartwachs



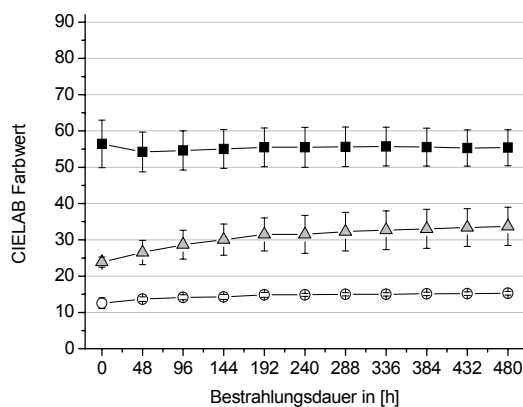
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System C, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

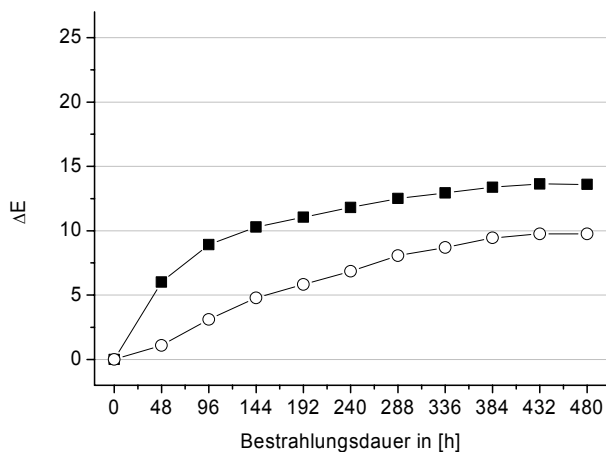


System C, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 4

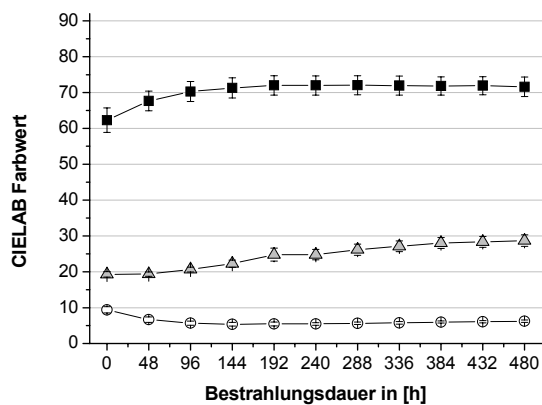
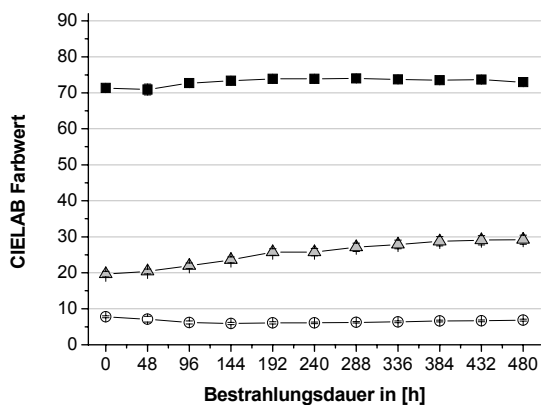
1. Serie

System D: PUR/Acrylat/Copolymer wasserverdünnbar



Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal

Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



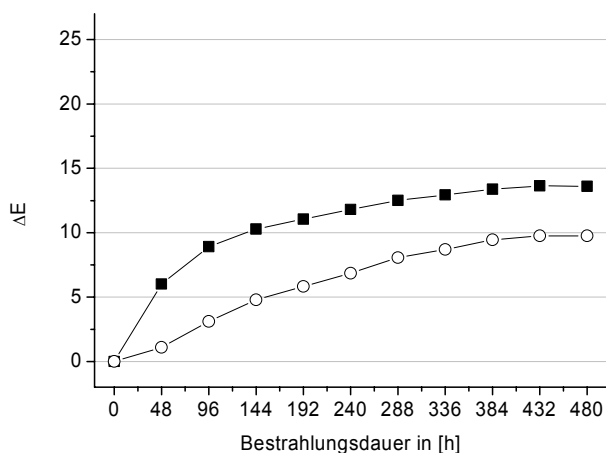
System D, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

System D, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 5

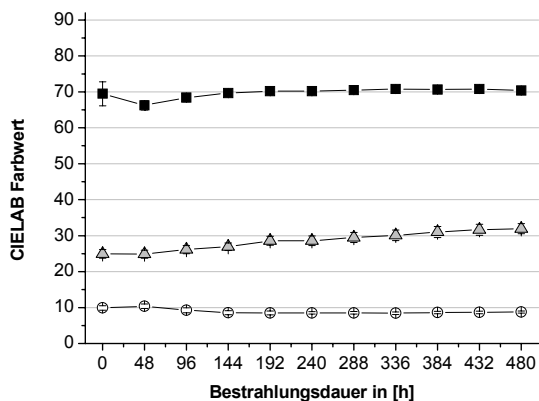
1. Serie

System E: PUR/Acrylat/PE lösemittelhaltig

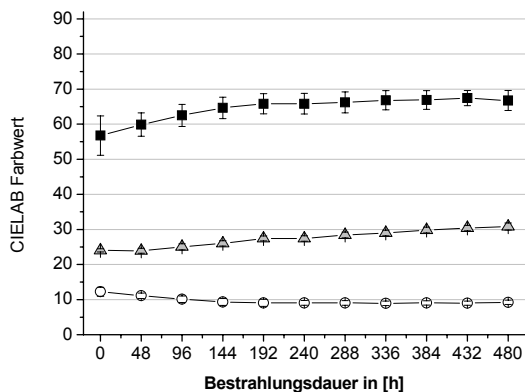


Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal

Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System E, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

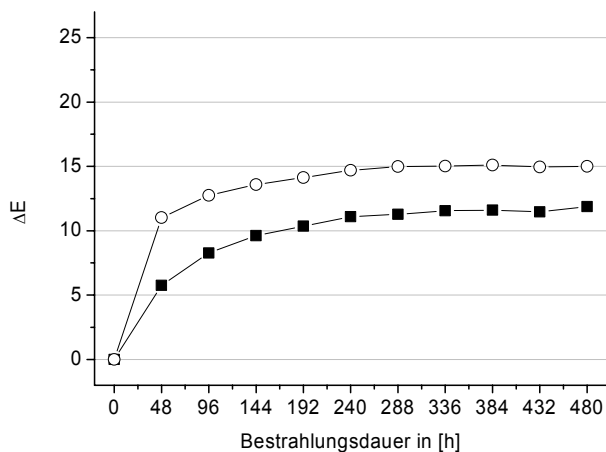


System E, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 6

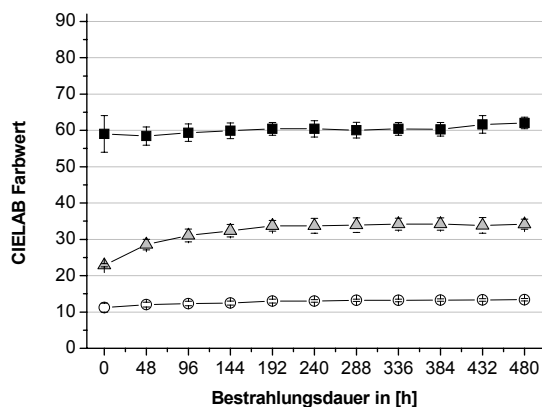
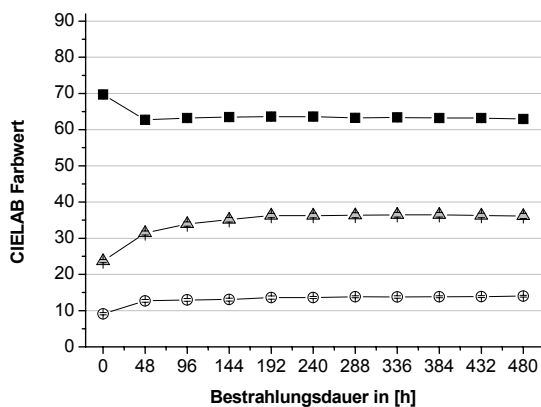
1. Serie

System F: Nitrocellulose / Alkydharz



Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal

Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



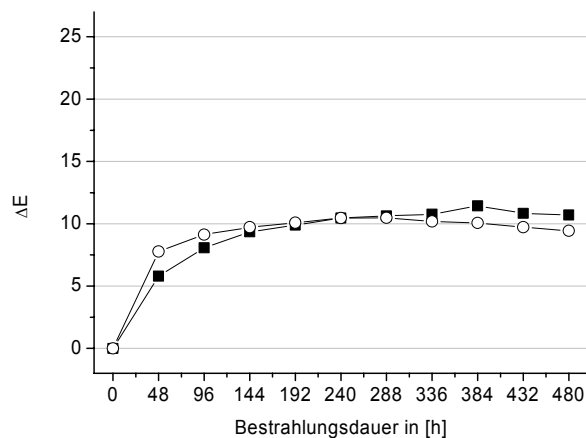
System F, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

System F, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 7

1. Serie

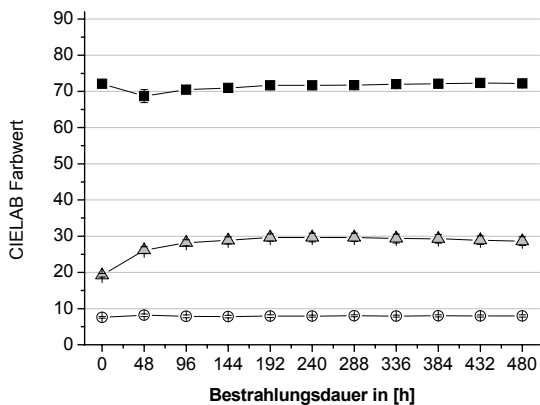
System G: Acrylat wasserverdünnbar



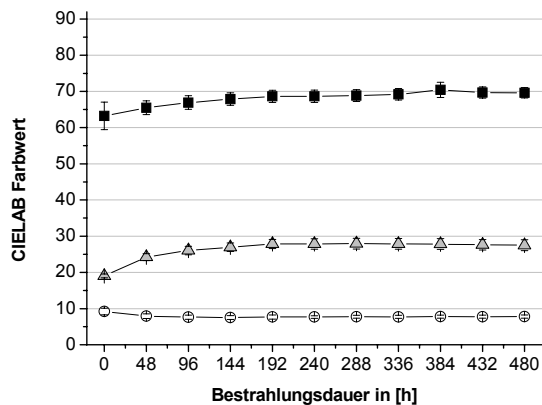
Gesamtfarveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System G, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

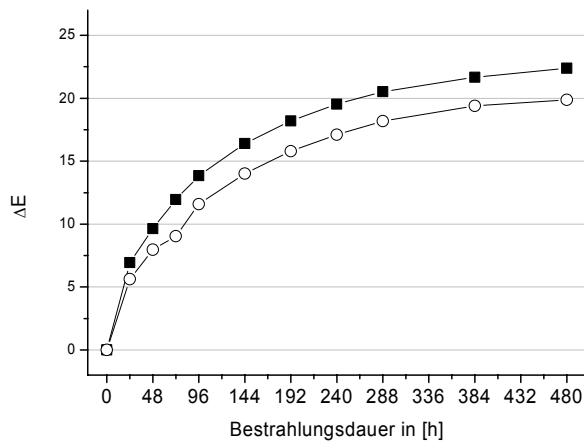


System G, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 8

2. Serie

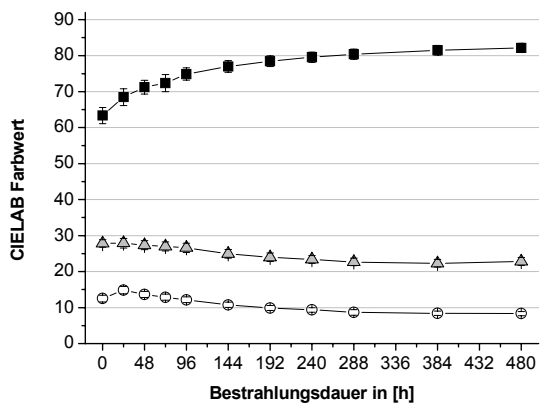
System 1: Grundierung: Lignostab 1198 1-2%;
 Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1-2%
 Tinuvin 99-2



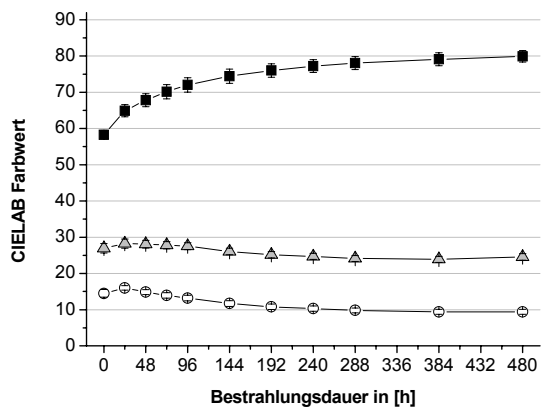
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System 1, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

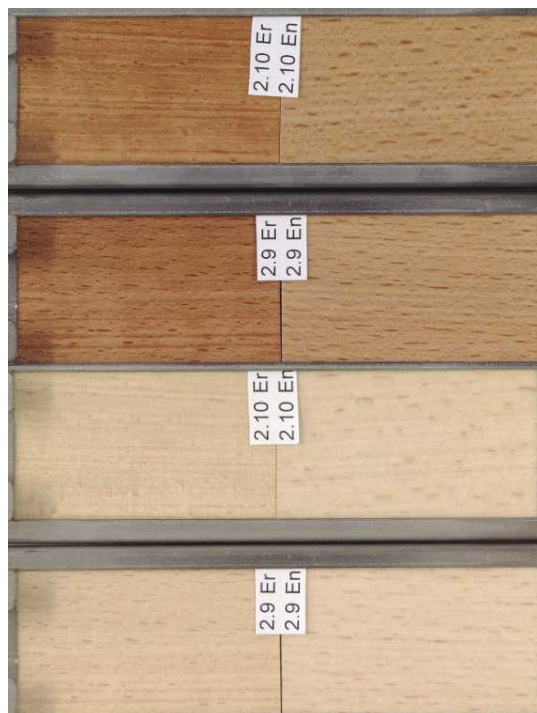
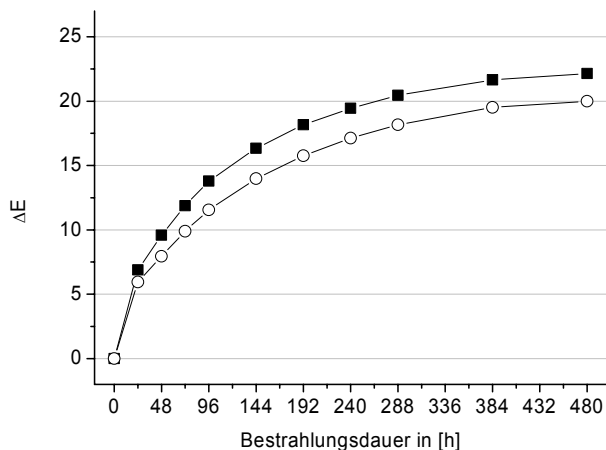


System 1, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 9

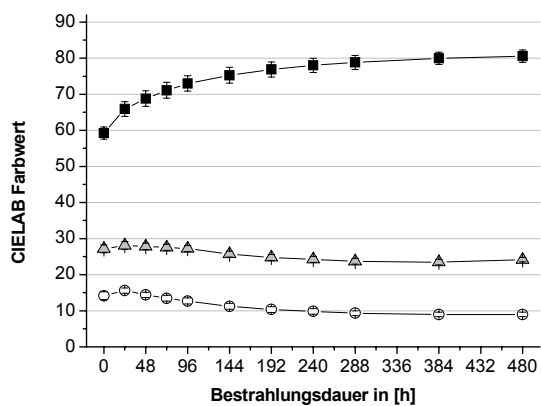
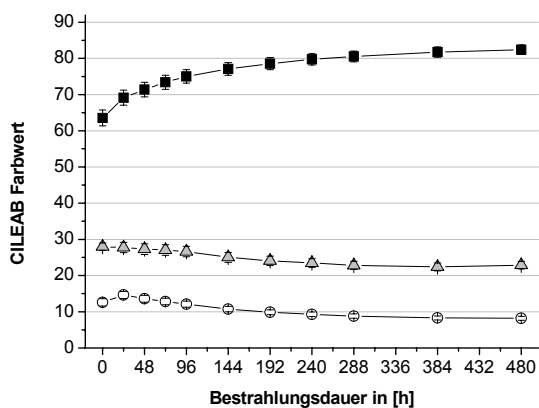
2. Serie

System 2: Grundierung: Lignostab 1198 1-2%;
 Lack: Astrodur DD Lack Nr. 1001 matt + 1% CGL
 777 MPA



Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal

Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



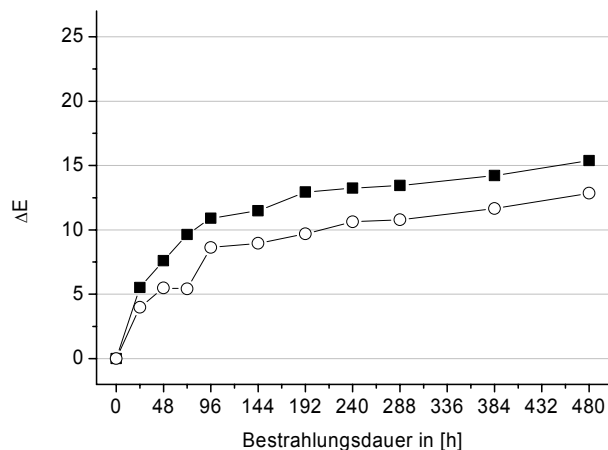
System 2, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

System 2, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 10

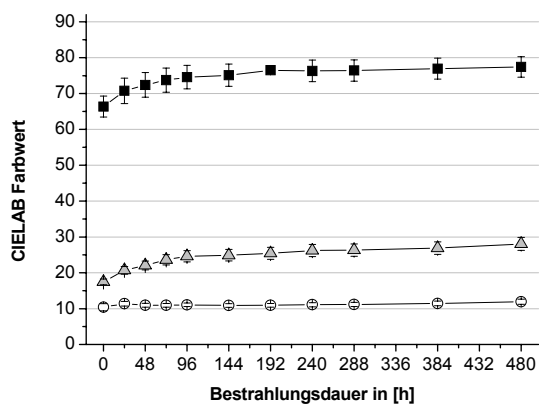
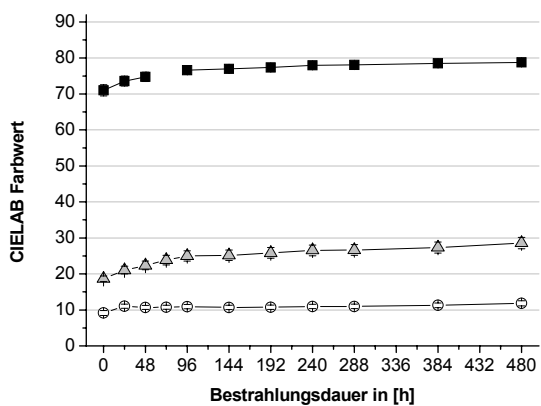
2. Serie

System 3: Lack: Reform Hydroflex 501 + 0.5-1% Hombitec RM 300 WP



Gesamtfarveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal

Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



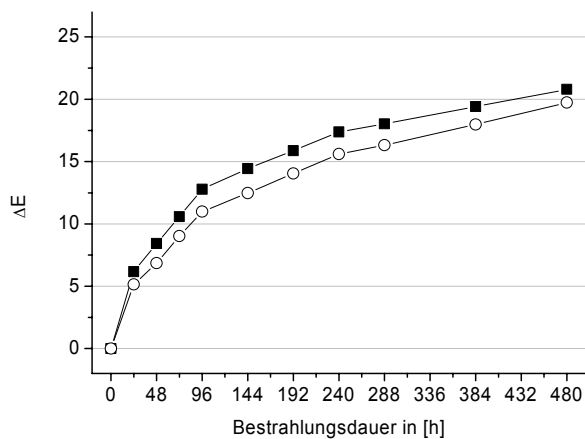
System 3, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

System 3, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 11

2. Serie

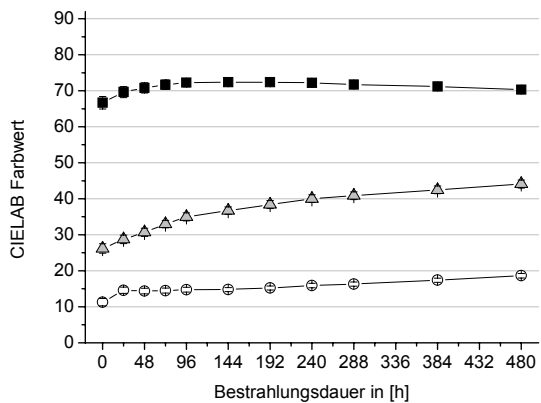
System 4: Lack: Monodur Einkomponenten Lack



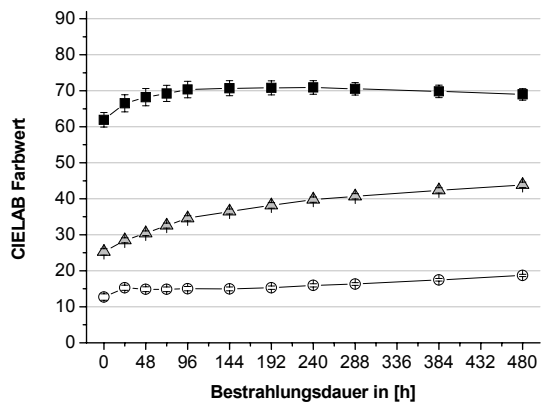
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rotkernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System 4, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

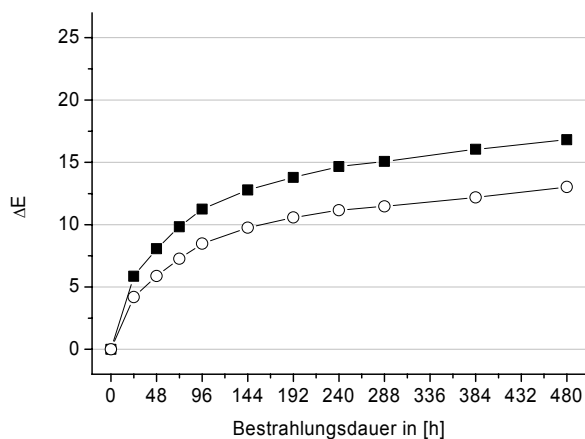


System 4, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

Tafel 12

2. Serie

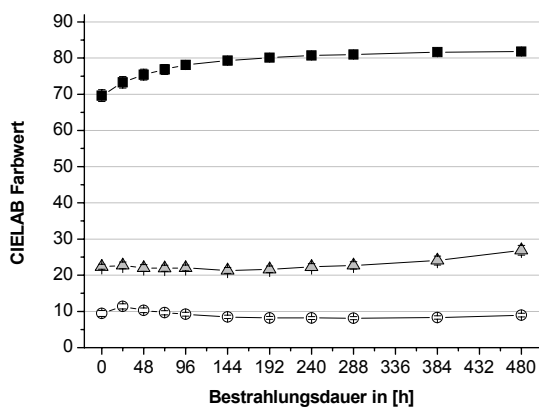
System 5: Lack: Reform Hydroflex 501 + 1-2%
 UVA Sanduvor disp. XP + 1% Hals sanduvor
 3021-2 disp. X



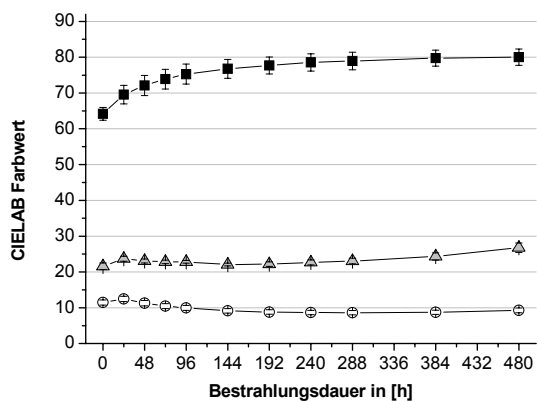
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rot-
 kernigen (links) und nicht rotkernigen Buche
 (rechts) vor (oben) und nach 480h der Be-
 strahlung (unten).



System 5, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a-
 und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Be-
 strahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

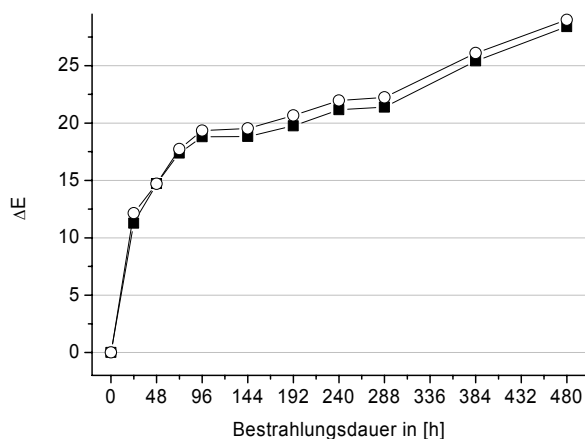


System 5, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-
 Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung.
 (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

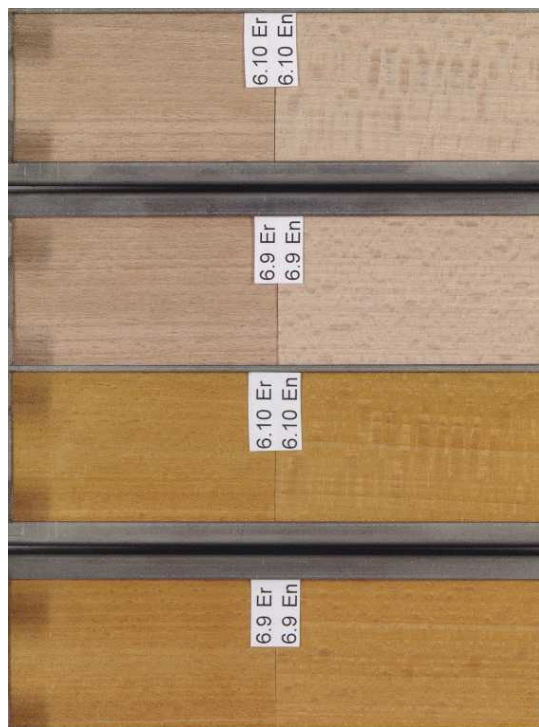
Tafel 13

2. Serie

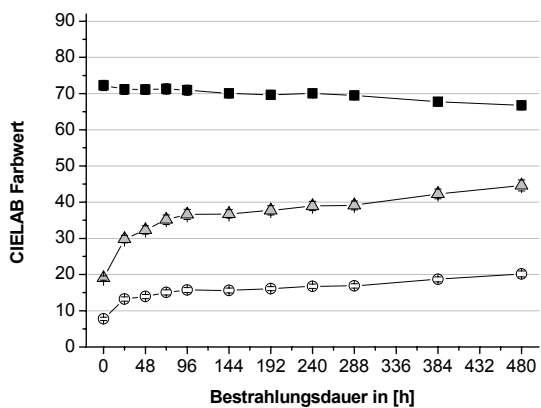
System 6: unbehandelt



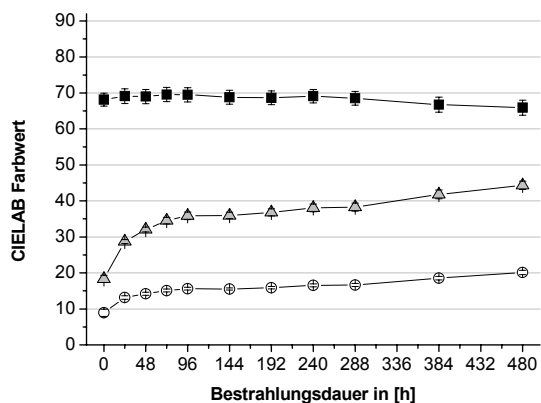
Gesamtfarbveränderung ΔE innerhalb 480 Stunden. -
 ■- Rotkern, -○- normal



Gegenüberstellung der Farbwirkung der rot-kernigen (links) und nicht rotkernigen Buche (rechts) vor (oben) und nach 480h der Bestrahlung (unten).



System 6, nicht Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.



System 6, Rotkern. Veränderung der L-, a- und b-Werte im Verlauf der 480 stündigen Bestrahlung. (-■-) L-Wert, (-○-) a-Wert, (-△-) b-Wert.

9.2 Anhang 2: Umfrage Sommer 2002

Ergebnis der Umfrage Sommer 2002

Kanton	Angaben aus Umfrage % Anteil Rotkern	Daten aus WSL Statistik * m ³ /Jahr durchschn. Einschlag Bu- che	Daten berechnet m ³ /Jahr Anteil Rotkernige Buche
AG	34	123000	41405
AI	vernachlässigbar	(1000)	
AR	20	7000	1400
BE	50	217000	108969
BL/BS	25	40000	10000
FR	56	53000	29813
GE	vernachlässigbar	0	
GL	keine Angaben	(12000)	
GR	35	25000	8750
JU	85	43000	36550
LU	50	91000	45639
NE	54	29000	15676
NW	50	7000	3500
OW	50	27000	13500
SG	57	39000	22100
SH	keine Angaben	(44000)	
SO	59	78000	46020
SZ	60	18000	10845
TG	58	41000	23933
TI	7	30000	2054
UR	30	3000	900
VD	36	89000	31882
VS	40	5000	2000
ZG	50	4000	2000
ZH	52	129000	66650
Schweiz gesamt	49	1068000	521532

Schriftliche Umfrage bei Schweizer Forstämtern sämtlicher Kanton: Rücklaufquote 71%

* Daten aus ^[1]