

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB
CH 2504 Biel-Bienne

Fachbereich Holz
Vertiefungsrichtung:
Process Management
PCM

DIPLOMARBEIT

**Untersuchung der Eignung der thermischen Behandlung
als Methode zur Farbegalierung
von Holz mit fakultativem Farbkern**

Von

Matthias Oelhafen
von Aarau, Kanton Aargau

6403 Küssnacht, im März 2005
Hofstrasse 13

Diplomarbeit Nr. F / 4 / D / 372 / 05 / 0

Sperrfrist: 0 Jahre

Verfasser

Matthias Oelhafen
Hofstrasse 13
CH 6403 Küssnacht

Erstprüfender Dozierender

Dr. Andreas Hurst, Fachbereichsleiter Holz, HSB Biel

Zweitprüfender Dozierender

Dr. Ernst Zürcher, Dozent für Werkstoffkunde, HSB Biel

Experte

Gion Toni Locher, Pavatex SA, 1701 Fribourg

Anschrift der HSB Biel

Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB
Fachbereich Holz
Solothurnstrasse 102
Postfach 6071
CH 2504 Biel-Bienne

Praktikumsstelle

ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Gruppe Holzphysik
ETH Höggerberg
CH-8093 Zürich

© 2005

CH 8093 Zürich

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei der ETH einzuholen.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit ist Teil des Ausbildungslehrgangs zum Holzingenieur FH an der Hochschule für Architektur Bau und Holz in Biel. Die Diplomarbeit entstand im Rahmen des obligatorischen Praktikums, welches ich am Institut für Baustoffe, in der Arbeitsgruppe Holzphysik, an der ETH Zürich absolvierte.

Während dem Studium lernte ich neben dem industriellen Bereich der Holzwirtschaft auch das Gebiet der Forschung kennen. Das Interesse und die Neugierde dieses Gebiet genauer kennen zu lernen veranlasste mich in der Gruppe von Prof. Dr. P. Niemz das Praktikum zu absolvieren.

In der Vorliegenden Arbeit befasste ich mich mit der thermischen Holzmodifikation. Das allgemein grosse Interesse an Thermoholz von Seiten der Forschung und der Wirtschaft gaben mir eine reale Basis für die durchgeführten Untersuchungen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Ing. habil P. Niemz, der als Projektbetreuer von Seiten der ETH jederzeit für Anfragen ein offenes Ohr hatte und mich mit zahlreichen guten Anregungen unterstützte.

Ein weiterer Dank gilt allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Holzphysik, die mich während des ganzen Praktikums fachlich unterstützen.

Danken möchte ich auch den Herren U. Scheicher von der Firma Bauwerk AG und P. Corbat von der Firma A+C Cobat SA die mir Versuchsmaterial und wertvolle Inputs von Seiten der Industrie gaben.

Ein weiterer Dank geht auch an die beiden betreuenden Dozenten Dr. A. Hurst und Dr. E. Zürcher die mir jederzeit mit Rat zur Seite standen.

Abstract

Das zentrale Thema dieser Arbeit besteht darin zu prüfen, ob bei rotkerniger Buche und braunkerniger Esche zwischen Kern und Splint mittels einer thermischen Behandlung eine Farbegalierung erzielt werden kann. Ferner wird anhand von Untersuchungen zur Veränderung der physikalischen Eigenschaften (Schwind- und Quellverhalten, Biegefestigkeit, Härte) die Eignung von thermisch behandeltem Buchen- und Eschenholz für die Parkettherstellung untersucht.

Der deutliche Farbunterschied von Buchensplint und Buchenrotkern sowie von Eschensplint und Eschenbraunkern wird durch die thermische Behandlung in Luftgasatmosphäre sichtlich reduziert. Eine Farbegalierung findet schon bei Temperaturen von 160° C statt. Die besten Resultate wurden bei Buche und Esche nach 12 bis 24 Stunden Behandlungszeit bei 180° C erzielt. Die Farbegalierung wird mit einer markanten Dunkelfärbung des Holzes erreicht. So lassen sich bei Temperaturen von 180° C und 200° C ansprechende dunkle Farbtöne erreichen. Bei rotkerniger Buche ist die Farbveränderung von lokal bedingten, streifenartigen Verfärbungen begleitet.

UV-Strahlung führt bei Thermoholz zu einer Vergrauung. Unbehandeltes Holz hingegen vergilbt. Thermoholzproben mit einer Acrylatversiegelung, so wie sie in der Parkettindustrie werkseits eingesetzt wird, weisen jedoch eine höhere Farbstabilität als unbehandelte, mit demselben Lack versiegelte Proben auf. Eine Wasserlackversiegelung, so wie sie bei bereits verlegtem Parkett zum Einsatz kommt, bringt gegenüber unversiegeltem Thermoholz keine Verbesserung der UV-Beständigkeit mit sich.

Die Gleichgewichtsfeuchte von thermisch vergütetem Buchenholz (24 h bei 180° C) sinkt in einem Klima von 20° C und 35 % relativer Luftfeuchte auf 46 % und in einem Klima von 20° C und 93 % relativer Luftfeuchte auf 76 % des unbehandelten Holzes. Die Gleichgewichtsfeuchte von Esche sinkt nach der gleichen thermischen Behandlung bei 20° C und 35 % relativer Luftfeuchte auf 52 % und bei 20° C und 93 % relativer Luftfeuchte auf 66 % des unbehandelten Holzes.

Die Biegefestigkeit parallel zur Faser sinkt nach 24 Stunden Behandlungszeit bei 180° C bei Buche und bei Esche um je 22 % gegenüber unbehandeltem Holz. Wird die Behandlungszeit bei 180° C halbiert, beträgt der Biegefestigkeitsverlust bei Buche nur noch 4 % gegenüber unbehandeltem Holz. Der Biegeelastizitätsmodul steigt bei beiden Holzarten um wenige Prozente an. Während sich nach der thermischen Behandlung (24 h bei 180° C) die Härte bei Buche in radialer und tangentialer Richtung gegenüber unbehandeltem Holz kaum verändert, nimmt sie bei Esche um 8 % zu. In longitudinaler Richtung nimmt die Härte bei Esche um 26 %, bei Buche sogar um 51 % zu.

Die thermische Behandlung führt weitgehend zur gewünschten Farbegalierung zwischen Farbkern und Splint. Ferner hat die thermische Behandlung im Hinblick auf die Verwendung im Parkettbereich positive Auswirkungen auf das Schwind- und Quellverhalten, auf die Härte sowie auf die Farbe des Holzes. Die negativen Auswirkungen des Biegefestigkeitsverlustes müssen bei der Verwendung von Thermoholz berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen durchaus eine verstärkte Anwendung der thermischen Vergütung zu.

Resumé

Le thème central de ce travail est de savoir s'il est possible d'unifier la couleur du coeur rouge du hêtre et du coeur brun du frêne et celle de leur aubier au moyen du traitement à haute température. Il est de plus à étudier, en se basant sur l'étude de la variation des propriétés physiques (comportement au retrait et au gonflement, résistance à la flexion, dureté), l'aptitude des bois de hêtre et de frêne rétifés à la fabrication des parquets.

La différence prononcée de la couleur du coeur rouge du hêtre et du coeur brun du frêne et de leurs aubiers est atténuée par le traitement thermique à l'air de manière visible. On constate déjà une unification de la couleur à une température de 160° C. C'est un traitement de 12 à 24 heures à une température de 180° C, qui donne les meilleurs résultats pour le hêtre et le frêne. En fonçant fortement la couleur du bois s'unifie. A des températures de 180° C et de 200° C on obtient de jolies teintes sombres. En changeant de couleur le hêtre à coeur rouge est localement marqué de striures.

Les rayons UV provoquent le grisonnement du bois rétifé alors que le bois non traité jaunit. Les échantillons de bois rétifé vernis à l'acrylate, comme c'est l'usage dans les fabriques de parquets présentent une couleur plus stable que les échantillons non traités vernis avec la même laque. Les vernis acqueux, comme ils sont utilisés pour les parquets déjà posés n'apportent par contre aucune amélioration quant à la résistance aux rayons UV.

L'équilibre hygroscopique du bois de hêtre rétifé (24 h à 180° C), s'abaisse dans un climat de 20° C et de 35 % d'humidité relative à 46 % de la valeur de celui du bois non traité et à 76 % pour une humidité relative de 93 %. L'équilibre hygroscopique du bois de frêne soumis au même traitement thermique s'abaisse à 52 % de la valeur de celui du bois non traité dans un climat de 20° C avec 35 % d'humidité relative et à 66 % pour une humidité relative de 93 %.

La résistance à la flexion parallèlement aux fibres diminue après 24 h de traitement à 180° C de 22 % chez les deux essences par rapport au bois non traité. Si l'on réduit de moitié le temps de traitement à 180° C la perte de résistance à la flexion chez le hêtre n'est plus que de 4 % par rapport au bois non traité. Le module d'élasticité à la flexion augmente de quelques pour cents chez les deux essences. Alors qu'après la rétifcation (24 h 180° C) la dureté du bois de hêtre en directions radiale et tangentielle ne diffère pas de celle du bois non traité, la dureté du bois de frêne augmente de 8 %. En direction longitudinale, la dureté du bois de frêne augmente de 26 %, celle du hêtre voire même de 51 %.

La rétifcation amène dans une grande mesure l'unification de couleur désirée entre le coeur coloré et l'aubier. De plus la rétifcation en regard de l'emploi dans le domaine des parquets a une influence positive sur le comportement au retrait et au gonflement, sur la dureté ainsi que sur la couleur du bois. Les effets négatifs de la perte de résistance à la flexion doivent être pris en considération lors de l'utilisation du bois rétifé.

Les résultats obtenus lors de cette étude plaident en la faveur d'une mise en pratique plus fréquente de la rétifcation.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Projektskizze	1
1.2	Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2.1	Rohstoff Holz	2
1.2.1.1	Die Buche: häufigster Laubbaum im Schweizer Wald	2
1.2.1.2	Die Esche: hoher Zuwachs, geringe Nutzung	3
1.2.2	Einsatzpotential von thermisch behandeltem Holz	3
1.3	Zielsetzungen der Arbeit	6
1.4	Vorgehensweise	6
2	ERKENNTNISSTAND	7
2.1	Werkstoff Holz	7
2.1.1	Kernholz	7
2.1.1.1	Die natürliche Farbkernbildung	7
2.1.1.2	Rotkern der Buche	8
2.1.1.3	Braunkern der Esche	8
2.1.1.4	Fakultative Kernholzsubstanzen von Laubholz	9
2.1.1.5	Die Thyllenbildung	9
2.2	Holzmodifikation	11
2.2.1	Thermische Behandlung von Holz	12
2.2.1.1	Frühe wissenschaftliche Untersuchungen auf diesem Gebiet	12
2.2.1.2	Masseverlust	13
2.2.1.3	Sorption / Quellung und Schwindung	13
2.2.1.4	Pilzresistenz	14
2.2.1.5	Mechanische Eigenschaften	14
2.2.1.6	Holzfarbe	14
2.2.1.7	UV-Beständigkeit	15
2.3	Industrielle Anwendung von thermisch vergütetem Holz	16
2.3.1	Marktübersicht	16
2.3.2	Verfahren	17
2.4	Parkettindustrie	20
2.4.1	Parkett	20
2.4.2	Wirtschaftliche Lage der Parkettindustrie	20
2.4.3	Anforderungen an den Rohstoff	20
2.4.4	Einsatz von modifiziertem Holz für Parkett	21
2.4.4.1	Polymerholz für Parkett	22
2.4.4.2	Thermisch behandeltes Holz für Parkett	22

3	BEGRIFFSERKLÄRUNG	24
3.1.1	CIEL*a*b-Farbsystem	24
3.1.2	Witterungsbeständigkeit von Holz	24
3.1.3	Wasserdampfsorption	26
3.1.3.1	Holzfeuchte	26
3.1.3.2	Schwind- und Quellverhalten	26
3.1.4	Dichte	26
3.1.5	Härte	26
3.1.6	Biegefestigkeit	27
3.1.7	Rasterelektronenmikroskop	27
3.1.8	Statistische Auswertung	27
4	MATERIAL UND METHODEN	29
4.1	Versuchsmaterial	29
4.1.1	Rotbuche <i>Fagus sylvatica</i> L.	29
4.1.2	Esche <i>Fraxinus excelsior</i> L.	31
4.2	Vorversuche	32
4.2.1	Ziel der Vorversuche	32
4.2.2	Einteilung der Vorversuche nach Behandlungsmethoden	32
4.2.3	Behandlungsparameter	33
4.2.4	Ergebnisse der Vorversuche	34
4.3	Hauptversuche	35
4.3.1	Versuchsübersicht	35
4.3.2	Versuchsdurchführung	35
4.4	Prüfmethoden	37
4.4.1	Farbmessung	37
4.4.2	Künstliche Bestrahlung	38
4.4.3	Sorptions- und Quellungsprüfung	41
4.4.4	Prüfung der Masseänderung	42
4.4.5	Härteprüfung	43
4.4.6	Biegebruchprüfung	44
5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	47
5.1	Optische Eigenschaften	47
5.1.1	Farbegalierung	47
5.1.1.1	Holzfarbe des unbehandelten Buchenholzes	47
5.1.1.2	Holzfarbe des thermisch behandelten Buchenholzes	48
5.1.1.3	Egalisierungseffekt bei Buche	50
5.1.1.4	Holzfarbe des unbehandelten Eschenholzes	52
5.1.1.5	Holzfarbe des thermisch behandelten Eschenholzes	53
5.1.1.6	Egalisierungseffekt bei Esche	56
5.1.1.7	Diskussion	57
5.1.2	Farbstabilität	58
5.1.2.1	Farbstabilität von Buche	58
5.1.2.2	Farbstabilität von Esche	61
5.1.2.3	Diskussion	64
5.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften	65
5.2.1	Verhalten gegenüber Feuchte	65

5.2.1.1	Sorptionsverhalten und Quellung von Buche.....	65
5.2.1.2	Sorptionsverhalten und Quellung von Esche	66
5.2.1.3	Diskussion.....	68
5.2.2	Masseänderung durch die thermische Behandlung	68
5.2.2.1	Änderung der Buchenholzmasse.....	68
5.2.2.2	Änderung der Eschenholzmasse	69
5.2.2.3	Diskussion.....	70
5.2.3	Festigkeitseigenschaften	70
5.2.3.1	Härte von Buche.....	70
5.2.3.2	Härte von Esche	72
5.2.3.3	Biegefestigkeit von Buche.....	74
5.2.3.4	Biegefestigkeit von Esche	76
5.2.3.5	Diskussion.....	77
5.3	Rasterelektronenmikroskop (REM)	78
5.3.1	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Buche	78
5.3.2	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Esche.....	79
5.3.3	Diskussion	79
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAKTISCHE ANWENDUNG DER ERGEBNISSE.....	80
6.1	Farbegalisierung und Farbstabilität	80
6.2	Physikalische und Mechanische Eigenschaften.....	81
6.3	Relevante Aspekte für industrielle Anwendungsbereiche	81
	VERZEICHNISSE.....	83
	Literatur	83
	Abkürzungen und Symbole	87
	Abbildungen	88
	Tabellen.....	90
	Diagramme.....	91
	Formeln	93
	ZWINGENDE FORMEN	94
	Eidesstattliche Erklärung.....	94
	Note / Abnahmeerklärung	95
	Teilnoten	95
	Schriftliche Beurteilung der Arbeit durch die Prüfer	96
	ANHANG	97

1 Einleitung

1.1 Projektskizze

Die Diplomarbeit ist Bestandteil des Gesamtprojektes „Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Holz. Bestandesaufnahme und Testung neuer Einsatzbereiche für schwer absetzbare Sortimente“, welches von der Gruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe der ETH Zürich durchgeführt und aus Mitteln des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung finanziert wurde.

Das Gesamtprojekt wurde in zwei Teilaufgaben durchgeführt. Im ersten Teil stand die Prüfung der Praxistauglichkeit von thermisch behandeltem Holz zur Diskussion, bearbeitet von einer Mitarbeiterin der ETH Zürich. Thermisch behandeltes Holz wurde nach mehrjährigem Einsatz auf seine Praxistauglichkeit hin evaluiert. Dabei ging es darum abzuschätzen, wie und ob sich die verschiedenen Behandlungsmethoden praktisch bewährt haben und welche Probleme bei der Verarbeitung von thermisch behandeltem Holz auftraten.

Im zweiten Teil wurde die Eignung des thermischen Behandlungsverfahrens zur Qualitätserhöhung von Holz mit starken Farbabweichungen geprüft und ist somit Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit. Es wurde untersucht, ob mittels einer thermischen Behandlung eine Homogenisierung von natürlich bedingten Holzfarbunterschieden erzielt werden kann. Damit sollen neue Wege für eine Nutzung der thermischen Vergütung eröffnet und auch eine Erhöhung der Wertschöpfung von Holz mit unerwünschten Farbabweichungen erreicht werden.

Die vorliegende Diplomarbeit bearbeitet einen Teilaspekt (siehe Kapitel 1.3 Zielsetzungen) aus dem zweiten Teil des Gesamtprojektes.

Das Thema der thermischen Vergütung von Holz wird schon seit einigen Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen bearbeitet. Es liegen in diesem Bereich zum Sorptionsverhalten, den mechanischen Eigenschaften und der Resistenz gegen Pilze auch gut dokumentierte Ergebnisse vor, auf die in dieser Arbeit zurück gegriffen werden konnte. Weniger erforscht und dokumentiert ist jedoch die Frage, ob und wie weit die natürlich bedingten, oft starken Farbabweichungen im Holz durch die thermische Behandlung egalisiert werden können. Die vorliegende Arbeit legt den Fokus vor allem auf diese Frage.

Die Diplomarbeit wurde als Forschungsarbeit durchgeführt. Die thermischen Behandlungen und Prüfungen wurden alle im Labormassstab durchgeführt.

1.2 Ausgangslage und Problemstellung

Holz ist einer der wenigen nachwachsenden Rohstoffe. Die nachhaltige Produktion von Nutzholz und deren Einsatz ohne chemischen Holzschutz spricht für einen äusserst ökologischen Baustoff.

In der Schweiz wächst heute etwa doppelt soviel Holz nach, wie jährlich geerntet wird [81]. In der Bauindustrie ist das grösste Einsatzpotential für Holz zu sehen. In der Aussenanwendung (z. B. Fassadenbau), so wie auch im Innenbereich müssen Anstrengungen unternommen werden, um dem Baustoff Holz zu einer grösseren Marktpräsenz zu verhelfen.

Bedingt durch das gewachsene Umweltbewusstsein gewinnt die Verwendung von Holz speziell im Bauwesen zunehmend an Bedeutung. Vor allem beim Einsatz von unbehandeltem Holz oder naturnaher Produkte ohne chemischen Holzschutz ist die Nachfrage gestiegen. Daher ist der Bedarf an ökologisch und wirtschaftlich sinnvollen Methoden zur Vergütung von Holz stark gestiegen. Hinzu kommt die Problematik der Einfuhr und Verwendung von Tropenhölzern mit meist dunklen Farbtönen. Man möchte diese mit einheimischen Holzprodukten von ähnlicher Dauerhaftigkeit und Aussehen ersetzen können.

Das stellt hohe Anforderungen an den Werkstoff Holz. Für manche Verwendungszwecke, wie zum Beispiel bei Aussenanwendungen, ist das Holz vorgängig einer Schutzbehandlung zu unterziehen. Versucht wird dabei das Quell- und Schwindverhalten zu reduzieren, die Resistenz gegenüber holzerstörenden Pilzen und Insekten zu erhöhen sowie die Farbe gegenüber den Witterungseinflüsse zu stabilisieren. Sehr oft kommen dabei für solche Einsatzbereiche noch chemische Holzschutzmittel zum Einsatz. Das so behandelte Holz gehört in der Regel am Ende des Verwendungszyklus in die Kategorie des Sondermülls, der in Spezialverbrennungsanlagen entsorgt werden muss.

Bei Holzarten wie Buche und Esche kommen vielfach Farbfehler vor, die von den Verbrauchern nicht akzeptiert werden. Dieses Holz ist schlecht verkaufbar. Als Beispiel seien der Rotkern der Buche und der Braunkern der Esche genannt. Im Rahmen des Projektes soll geprüft werden, ob durch die thermische Behandlung eine Farbegalierung erreicht werden kann, die zu einem verbesserten Marktwert dieses Materials führt.

1.2.1 Rohstoff Holz

Im Hinblick auf den derzeitigen Umbau der Schweizer Wälder und einer damit verbundenen Ausdehnung der Laubholzproduktion ist es wichtig, dass die Voraussetzungen für eine vermehrte Anwendung von Laubholz auch in Massenanwendungen geschaffen werden. Die Zuwachsrate auf den Gesamtbestand von Buche und Esche betragen derzeit pro Jahr 3.2 % (Buche) und 4 % (Esche) im Gegensatz zu Fichte mit 2.5 % [81]. Während hochwertiges Buchen- und Eschenholz einen guten Absatz in der Möbelindustrie hat, sind mindere Qualitäten auf dem Markt nur schwer und zu sehr tiefen Preisen absetzbar.

1.2.1.1 Die Buche: häufigster Laubbaum im Schweizer Wald

Die Buche hat heute in der Schweiz einen Anteil von 17 % aller Baumarten. Sie ist somit die häufigste Laubbaumart im Schweizer Wald. Der Holzvorrat von Buche in der Schweiz beträgt etwa 71.5 Millionen Kubikmeter. Der natürliche Zuwachs von Buche macht 1.96 Millionen Kubikmeter pro Jahr aus, wovon jährlich im Durchschnitt 1.15 Millionen Kubikmeter geerntet werden [81]. So findet jährlich eine Überproduktion an Buchenholz zu 41 % statt. Die Buchenbestände werden somit immer grösser und älter. Einerseits wird so das Nachkommen jüngerer Bäume erschwert und andererseits nimmt die Qualität des Buchenstammholzes ab einem bestimmten Baumalter stark ab. Beim geernteten Buchenstammholz, vor allem bei älteren Bäumen mit grossen Stammdurchmessern, kommt es neben den Wachstumsspannungen zu erhöhter Bildung von Rotkern. Der Wert des als fehlerhaft oder minderwertig deklarierten rotkernigen Buchenholzes wird massiv herabgesetzt und stellt damit ein beachtliches wirtschaftliches Problem bei der Vermarktung des Buchenstammholzes dar.

In den Schweizerischen Handelsgebräuchen für Rundholz [96] ist in der Qualität A von Buchenrundholz der Rotkern ausgeschlossen, die Qualität B erlaubt einen Rotkernanteil der kleiner ist als ein Drittel des Stammdurchmessers. Nur in den minderwertigen Qualitäten C und D ist Rotkern uneingeschränkt erlaubt. Erhebliche Einnahmeeinbussen in der Forstwirtschaft sind die Folgen.

Laut einer Umfrage vom Sommer 2002, die von der EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) in Dübendorf im Rahmen einer Arbeit über rotkerniges Buchenholz [72] durchgeführt wurde, beträgt der durchschnittliche Anteil an Rotkern von Buchenstammholz schweizweit 49 %. Dieser Wert basiert jedoch zum Teil nur auf Schätzungen, weil in der Schweiz keine offizielle Statistik über rotkerniges Buchenholz betrieben wird.

Beim Vergleich der Buchenholzpreise ist ersichtlich, dass die grössten preislichen Unterschiede hinsichtlich des Rotkerns beim Stammholz zu verzeichnen sind. Bei Industrie- und Brennholz ist kaum ein preislicher Unterschied festzustellen.

Ein bis vor kurzer Zeit wichtiges Absatzgebiet für minderwertige Buche (Rundholzqualitäten C und D) war die Produktion von Bahnschwellen. Seitdem die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) im Geleisebau vermehrt Stahl- und Betonschwellen einsetzen, ist jedoch der Absatz von qualitativ untergeordnetem Buchenholz stark zurückgegangen. Einzig auf Bahnstrecken mit engen Kurvenradien hat die Holzschwelle wegen ihrer schwingungsdämpfenden Eigenschaften bisher keine Konkurrenz. Das seit dem 01.10.2001 in Kraft gesetzte Verbot für die Abgabe und Verwendung von mit Teeröl imprägnierten Holzschwellen schränkt die Verwendung von Buchenholz bei Bahnschwellen zusätzlich ein. Die SBB müssen seither die ausgedienten teerölimprägnierten Bahnschwellen fachgerecht entsorgen und dürfen keine weiteren Geschäfte zur Weiterverwendung der Bahnschwellen tätigen. Grund dafür sind die gesundheitsgefährdenden polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), die im Teeröl enthalten sind.[57]

1.2.1.2 Die Esche: hoher Zuwachs, geringe Nutzung

Die Esche kommt in der Schweiz mit einem Anteil an der gesamten Stammzahl von 3.7 % vor. Mit einer Zuwachsrate von 4 % liegt sie im Schweizer Wald an erster Stelle. Der Holzvorrat von Esche in der Schweiz beträgt etwa 11.7 Millionen Kubikmeter, wovon jährlich im Durchschnitt 0.19 Millionen Kubikmeter geerntet werden. Der Zuwachs an Esche beträgt jährlich 0.38 Millionen Kubikmeter.[81]

Momentan sind die dunklen Hölzer wieder im Trend. Dies führt zu einer sinkenden Nachfrage bei Esche. Die Preise für Eschenrundholz liegen daher extrem niedrig. Für Rundholzqualität B, Durchmesserklasse 4 sind im Moment nur gerade 80 SFr./m³ [36] zu erhalten. Der Braunkern der Esche lässt die Preise fallen. So wird in Qualität A Braunkern ausgeschlossen. In Qualität B ist Braunkern erlaubt.[96]
Zahlen über das Vorkommen von Braunesche im Schweizer Wald liegen keine vor.

1.2.2 Einsatzpotential von thermisch behandeltem Holz

Eine Alternative zu der verbreiteten Möglichkeit des Einsatzes von chemischen Holzschutzmitteln stellt die thermische Vergütung des Holzes dar.

Auf dem europäischen Markt wird heute eine Vielzahl von nach unterschiedlichen Methoden behandeltem Holz als Thermoholz angeboten (siehe Kapittel 2.3).

Der Verbraucher muss beim Einsatz von thermisch behandeltem Holz beachten, dass sich fast alle Eigenschaften des Holzes durch eine Thermobehandlung verändern und das nicht ausschliesslich zum Positiven. So kann eine Abnahme der Biegefestigkeit und der Härte durch die thermische Behandlung auftreten. Die Art und das Ausmass der Eigenschaftsänderungen ist stark von den Prozessparametern abhängig.

Durch die thermische Behandlung wird eine Verringerung des Quell- und Schwindverhaltens erzielt [15] . Ebenso steigt in gewissem Umfang die Widerstandsfähigkeit gegen Pilze [5] [56]. Daher eignet sich das Material gut für den Einsatz in Bereichen mit wechselnder oder hoher Luftfeuchte sowie in Bereichen mit hoher Pilzbefallswahrscheinlichkeit.

Im Fenster- und Türenbau wird besonders Wert auf eine hohe Dimensionsstabilität der verwendeten Werkstoffe gelegt. Ein witterungsbedingtes Quellen und Schwinden könnte bei Fenstern zu Rissen in der Oberflächenbeschichtung und damit zur Eindringung von Wasser führen. Aufgrund der verbesserten Dimensionsstabilität von thermisch behandeltem Holz könnte dem Material in diesem Bereich durchaus ein Marktpotential zugesprochen werden. Auch die verminderte Wärmeleitfähigkeit unterstreicht die Eignung des Materials für Türen und Fenster.

Weitere Einsatzmöglichkeiten für thermisch behandeltes Holz in der Aussenanwendung sind im Garten- und Landschaftsbereich, z.B. für Gartenmöbel oder Spielplatzgeräte sowie im Terrassen-, Fassaden- und Schallschutzbereich zu finden.

Beim Einsatz von thermisch behandeltem Holz im Innenbereich wird vor allem der dunkle Farbton geschätzt, der sich über den gesamten Querschnitt erstreckt. Je nach Behandlungsart und -grad kann die Färbung zwischen einem hellen Brauntönen bis hin zu einem Schwarzbraun variieren. So könnte sich thermisch behandeltes Holz auch im Möbel- und Innenausbaubereich als konkurrenzfähiges Produkt etablieren. Vielfach wird thermisch behandeltes Holz auch als „Tropenholzersatz“ verwendet. In Abbildung 1 sieht man die Verwendung von thermisch behandelte Buche im Innenbereich.



Abbildung 1: Einsatz von thermisch behandelte Buche am Flughafen Zürich

In der Parkettindustrie werden bereits Buche und Esche verbreitet eingesetzt. Der zurzeit rückläufige Trend von hellen Hölzern lässt auch in diesem Bereich den Absatz von Buche und Esche schrumpfen. Durch die aktuelle Bauweise, grosszügige Räume mit grossen Fensterflächen und wenigen aber exklusiven Möbeln, hellen und schlichten Wände und Decken, gewinnt der Boden als zentrales Einrichtungselement immer mehr an Bedeutung. Der Boden wird oft als Kontrapunkt zu den weissen Wänden und Decken eingesetzt und das immer öfter in dunkeln Farben. Somit ist dunkles Parkett im Trend. Es kommen vermehrt dunkle und warme Hölzer zum Einsatz. Neben dunkeln Edelhölzern aus tropischen Regionen werden die warmen Braun- und Rottöne durch Dämpfen, Räuchern oder thermisches Behandeln einheimischer Hölzer erreicht. Unabhängig von diesem Trend sind nach wie vor auch Parkettböden mit weiss und grau pigmentierten Hölzern gefragt.

Durch den Einsatz von thermisch vergütetem Holz in der Parkettindustrie könnte man den Absatz von einheimischen Laubhölzern gegebenenfalls verbessern. Dies würde kürzere Transportwege, eine Stärkung der regionalen Holz- und Waldwirtschaft, sowie eine Minderung der Problematik um die Einfuhr von tropischen Hölzern mit sich bringen.

Die sich ändernde Holzfarbe und die erhöhte Dimensionsstabilität von thermisch behandeltem Holz sprechen für einen Einsatz im Parkettbereich. Eine ausreichende Härte sowie eine genügende Wärmeleitfähigkeit beim Einsatz von thermisch behandeltem Holz auf Fussbodenheizung sind für das Material von Bedeutung.

1.3 Zielsetzungen der Arbeit

Auf dem Hintergrund der geschilderten Ausgangslage wird deutlich, dass die thermische Vergütung von Holz einerseits im Bereich des chemischen Holzschutzes eine interessante Alternative darstellt (Ersatz von chemischen Holzschutzmitteln) und andererseits einen wichtigen Beitrag zum Schutz und zur Erhaltung gefährdeter tropischer Wälder (Ersatz von Tropenhölzern) leistet. Sollte ferner durch die thermische Behandlung eine Farbegalierung erreicht werden können, ohne wichtige physikalische Eigenschaften dabei einzubüßen, wäre eine intensivere Nutzung der thermischen Vergütung gegeben.

1. Deshalb geht es in der vorliegenden Arbeit darum zu prüfen, ob und wie weit eine Homogenisierung der Farbunterschiede zwischen Splint- und Rotkernholz von Buche sowie zwischen Splint- und Braunkernholz von Esche durch die thermische Behandlung möglich ist.

Dabei wird der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen sowie der Einfluss der Behandlungsdauer der thermischen Vergütung auf Buche und Esche untersucht.

In einem weiteren Schritt wird beurteilt, ob eine thermische Vergütung für optisch minderwertige Holzsortimente, wie rotkernige Buche oder braunkernige Esche, eine qualitätssteigernde Verbesserung mit sich bringt.

2. Ausserdem wird die thermische Behandlung auf eine Eignung im Parkettbereich untersucht. Dazu werden spezifische Holzeigenschaften auf einen Einsatz im Parkettbereich geprüft. Dabei handelt es sich um materialtechnologische Eigenschaften wie Holzfarbe, Farbstabilität, Schwind- und Quellverhalten, Härte und Biegefestigkeit.

Die Wirtschaftlichkeit von thermisch behandeltem Holz zur Parketterzeugung wird in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

1.4 Vorgehensweise

Zu Beginn der Arbeit wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Dabei wurde der Werkstoff Holz genauer betrachtet und es wurden Recherchen über die fakultative Farbkernbildung durchgeführt. Ein weiteres Ziel der Recherchen war es, die wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse über Thermoholz aufzuzeigen. Darauf aufbauend wurden die Verfahren und deren Behandlungsparameter für die Vorversuche ausgewählt. Aufbauend auf den Vorversuchen wurden die Hauptversuche durchgeführt. Im Anschluss wurden Farbmessungen und die physikalischen Eigenschaftsprüfungen durchgeführt. Gleichzeitig konnte mittels Kontakten zur Holzwirtschaft über den möglichen Einsatz von Thermoholz im Parkettbereich diskutiert werden. Es ging darum darzulegen, wo Probleme im Zusammenhang mit der Verwendung von Holz in der Parkettindustrie auftreten und ob allenfalls diese mit dem Einsatz von thermisch behandeltem Holz lösbar wären. Es galt auch aufzuzeigen, welche Holzeigenschaften bei der Verwendung von Thermoholz im Parkettbereich von Bedeutung sind.

2 Erkenntnisstand

2.1 Werkstoff Holz

2.1.1 Kernholz

Die überwiegende Mehrzahl der Hölzer zeigt nach Überschreitung gewisser Altersgrenzen eine mehr oder weniger ausgeprägte Veränderung des Innenholzes, die allgemein als Verkernung bezeichnet wird. Zu den ältesten Verkernungsmerkmalen gehören die Verfärbung des Holzes, der unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalt und die An- oder Abwesenheit von Stärke sowie von Thyllen im Laubholz.[18] [93]

Bei verschiedenen Baumarten werden die Zellwände des inneren, toten Holzkörpers mit Substanzen imprägniert, die das Wachstum von Mikroorganismen beeinträchtigen oder gar verunmöglichen und häufig eine besondere Verfärbung des Holzes verursachen. Man spricht bei diesen Baumarten von obligatorischer Farbkernbildung, da die Vorgänge, die zur Kernbildung führen, genetisch gesteuert sind. Andere Baumarten, zu denen auch die Buche und Esche gehören, bilden im Gegensatz zu den obligaten Farbkernholzbildnern keinen durchgehenden Kern, sondern reagieren nur auf exogene Faktoren. Dabei verfärbt sich das tote Holz für die einzelnen Baumarten in charakteristischer Weise. Man spricht bei diesen Baumarten von fakultativer Farbkernbildung, da diese an ein nur gelegentlich auftretendes Ereignis gebunden sind. Der fakultative Farbkern schliesst nach aussen hin nicht mit einem Jahrring ab, sondern weist wolkgige Ausbuchtungen auf. Gegenüber dem umgebenden helleren Holz ist der fakultative Farbkern feuchter und von höherem Mineralstoffgehalt.[94]

2.1.1.1 Die natürliche Farbkernbildung

Ein Farbkern kann sich erst dann bilden, wenn Kernholz im Stamm bereits ausgebildet ist. Laut Zycha [97] ist für die fakultative Farbkernbildung von Holz das Eindringen von Luft in das Bauminnere massgebend. Auch Huber [51] stellt fest, dass mit der Gasfüllung der Gefässbahnen der Verkernungsvorgang eingeleitet wird. Für den Gaseintritt in das Holz kommen nach Zycha [97] folgende Wege in Betracht: Durch eine Gasentbindung aus dem Gefässwasser im Zusammenhang mit der Ausserfunktionsetzung einzelner Gefässe. Weiter über die Diffusion von Luftgas in die Zellen durch Rinde, Kambium und Markstrahlen und direktes Eindringen von Aussenluft in die Leitungsbahnen bei absterbenden Ästen, Blattnarben und anderen Eingangspforten. Die Füllung von Gefässen mit solcher Luft und der fortschreitende Wasserentzug führen zur Thyllenbildung (Siehe Kapitel 2.1.1.5).

Nach Kollmann [59] zeigt die Buche eine Grenzschwelle der Verkernung, die bei etwa 60 % Wassergehalt des Holzes liegt. Bei Esche liegt die Grenzschwelle bei 55 % Holzfeuchtigkeit. Bei höheren Feuchtigkeiten kommt es zu keiner Verkernung, weil die Zellen durch das Wasser von Sauerstoff der Holzluft abgeschlossen sind. Der sinkende Wassergehalt entsteht im Stamminneren auf natürliche Weise durch das Ausserfunktiontreten der wasserleitenden Gefässe.

Für die Holzverfärbung des Kernes und damit die eigentliche ästhetische Entwertung des Buchen- und Eschenholzes sind sehr häufig Gerbstoffe und andere parenchymatische Holzteile verantwortlich, die während des Verkernungsprozesses in braune Oxydationsprodukte umgewandelt werden.[18] [91] [93]

2.1.1.2 Rotkern der Buche

Der Rotkern wird durch exogene Faktoren ausgelöst. Bei der Ausbildung eines Rotkerns ist dieser rotbraun, meist wolkg abgesetzt oder auch sternförmig (Spritzkern).[72] [94]



A B
Abbildung 2: A) Buchenstämme mit Rotkern auf dem Rundholzplatz der Firma A+C Corbat sa in Vendlincourt (JU). Linker Stamm mit rund abgesetztem Rotkern und rechter Stamm mit spritzförmig abgesetztem Rotkern. B) Buchenholz mit ausgeprägtem Rotkern [40]

Rotbuche mit äusserlich erkennbaren Beeinträchtigungen wie zum Beispiel starken Faulästen, ausgemorschten Aststummeln, Zwieseln, Steilästen, Wipfeldürre, Frostrissen, sowie Rotbuchen mit Steinschlag-, Schäl-, Fällungs- und Rückeschäden weisen einen höheren Farbkernanteil auf als äusserlich einwandfreie Stämme. Bei Verletzungen vergrössert sich der Kern stets in Richtung der Verletzung. Auch der Standort hat einen Einfluss auf die Rotkernbildung. So neigt die Buche unter Wasserstress zur Rotkernbildung.[91] [90]

Die technologischen Eigenschaften von rotkerniger Buche gelten gegenüber unverfärbter Buche als unbeeinträchtigt. Jedoch stellten Pöhler et al. [72] zum Teil eine erhöhte Rohdichte und folglich auch in der Gesamtheit auch signifikante höhere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften fest. Die erhöhte Rohdichte der rotkernigen Buche hat auch eine höhere Brinell-Härte zur Folge.

2.1.1.3 Braunkern der Esche

Der Braunkern von Esche ist fakultativ in Bezug auf Zeitpunkt, Dimension und Vorkommen im Stamm [10]. Jüngerer Eschenholz bis ca. 70 Jahre hat noch keinen oder wenig Kern gebildet [9]. Ebenfalls begünstigen Verletzungen, Risse, Fauläste am Stamm den Luftsauerstoffeintritt. Esche auf feuchten Standorten neigt zu Braunkernbildung.

Die technologischen Eigenschaften von Eschenbraunkern sind gleichwertig wie Eschensplint. Sowohl auf die statischen Eigenschaften als auch auf die besonders wichtigen dynamischen Festigkeitseigenschaften hat die Verkernung keinen negativen Einfluss. Zu diesem Schluss kommt Kollmann [58] in seinen Untersuchungen.

Der Splint ist gelblich hell. Der Braunkern kann braunrötlich, fallweise auch graubraun sein, wie das in Abbildung 3 zu sehen ist. Die Grenze zwischen Splint und Braunkern ist nicht immer deutlich.



A



B

Abbildung 3: A) Eschenstämme mit Braunkernanteil im Staatswald Teufen (ZH) [39]. B) Eschenholz mit Braunkern

2.1.1.4 Fakultative Kernholzsubstanzen von Laubholz

Die Bildung der Kernholzstoffe wird durch ein vielfältiges Enzymsystem gesteuert und erfolgt neben der strukturellen Kernholzbildung (Thyllenbildung) [93]. Beim Verkernungsvorgang unterliegt die Gerüstsubstanz des Holzes keinen wesentlichen Veränderungen. Die akzessorischen Stoffe, vor allem Kohlenhydrate, phenolische Stoffe und Enzyme, machen den Umfang der Veränderungen aus.[18]

Die Veränderungen der Extraktstoffe werden durch Oxydations-, Kondensations- und Polymerisationsreaktionen verursacht. Dafür spricht einerseits die Bräunung der Zellinhaltsstoffe und andererseits, dass im Gegensatz zu den Splintinhaltsstoffen die Kernstoffe meist schwerer extrahierbar sind. Dietrichs [18] konnte nachweisen, dass im Rotbuchensplintholz Enzyme vorhanden sind, welche verschiedene phenolische Stoffe in braun gefärbte Produkte überführen.[18]

2.1.1.5 Die Thyllenbildung

Thyllen oder Füllzellen sind blasenförmige Ausstülpungen, die durch die Tüpfel von angrenzenden Holzstrahl- oder selten von axialen Parenchymzellen in das Lumen eines benachbarten Gefässes hineinwachsen (siehe Abbildung 4). Sie bewirken eine teilweise oder auch völlige Verschlussung von Gefässen auf weiten Strecken.[11] [93]

Die Ursache der Verthyllung ist noch nicht eindeutig aufgeklärt. Der bereits erwähnte Zusammenhang zwischen der Thyllenbildung und dem Wasser- Luft- Verhältnis in den Gefässen kann als Erklärung für die Verthyllung herangezogen werden.[18]

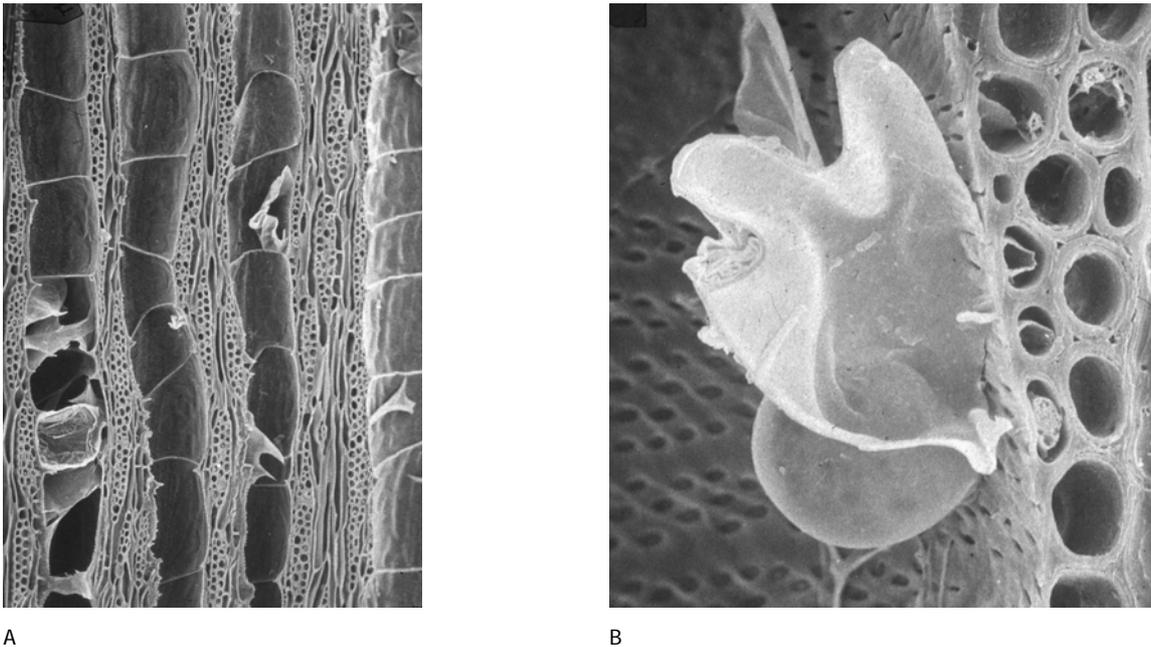


Abbildung 4: A): REM-Aufnahme von *Fraxinus excelsior*, tangential. Gefäßbahnen mit Thyllenausstülpungen (1. und 3. Gefäßbahn von links) [7]. B) REM-Aufnahme von *Fraxinus excelsior* tangential. Thyllenausstülpung in ein Gefäß [7]

Die submikroskopische Struktur der Thyllen zeigt einen Aufbau aus miteinander verflochtenen Fibrillen, die sie als Gebilde der Primärwand benachbarter Parenchymzellen kennzeichnen. Junge Thyllen weisen die Anwesenheit von Zellulose auf, in älteren Füllzellen treten daneben Pektine auf.

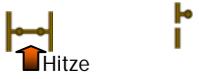
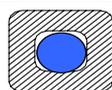
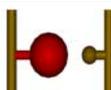
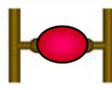
Die Thyllen haben einen wesentlichen Einfluss auf das Imprägnierverhalten von Holz. Bei der Verwendung als Schwellenholz aber auch als Polymerholz (siehe Kapitel 2.4.4.1) kommt der Tränkbarkeit oder Imprägnierbarkeit des Buchenholzes eine besondere Bedeutung zu. Das Buchenholz gilt im Vergleich zu anderen Hölzern als leicht imprägnierbar. Trotzdem sind oft unregelmässige und ungenügende Schutzmittelverteilungen im Buchenholz vorzufinden. Eine Ursache sind die Thyllen. Die mechanischen Gefäßverschlüsse im Farbkern machen den Rotkern schwer imprägnierbar. Als nicht tränkbar gelten einzig die schmalen Randzonen des Kerns. Buchmüller [14] begründet die schlechtere Imprägnierbarkeit von rotkernigem Buchenholz nicht durch die Aufnahmemenge des Imprägniermittels, sondern über die ungleichmässige Verteilung des Schutzmittels im Holz. Das rotkernige Holz selbst lässt sich leichter mit wässrigen Lösungen tränken als mit öligen Substanzen. Unabhängig von der Thyllenkonzentration ist der Grad der thermischen Behandlung des Holzes. Daher ist die Hitzebehandlung auch für schwer tränkbare Holzarten geeignet.

2.2 Holzmodifikation

Unter dem Begriff Holzmodifikation versteht man die Veränderung der Zellwand des Holzes sowohl als Massnahme zum Schutz des Holzes durch Erhöhung der Dauerhaftigkeit als auch zur Verbesserung von Dimensionsstabilität und Stehvermögen durch Verringerung von Schwinden und Quellen. Die Modifikationen des Holzes bewirken eine Veränderung der molekularen Struktur der Zellwandsubstanz.

In Tabelle 1 sind die heute praktizierten Modifizierungsverfahren und deren Wirkung auf die Zellstruktur aufgeführt.

Tabelle 1: Modifizierungsverfahren und deren Wirkung auf die Zellwand nach Millitz [66]

Modifizierungsverfahren	Wirkprinzip				
Hitzebehandlung					
Acetylierung					
Melaminharz					
Holzvernetzung					
Furfurylierung					
Silizium / Silikon / Silan					
Öl / Wachs					
Chitosan					
Füllung der Lumen	Füllung der Zellwand	Reaktion mit OH-Gruppen	Vernetzen mit OH-Gruppen	Zellwandstruktur ändern	
					

Die Acetylierung wurde bisher unter den chemischen Modifizierungen am intensivsten untersucht. Hierbei wird Holz mit Essigsäureanhydrid imprägniert. Bei Temperaturen über 100° C werden die Hydroxylgruppen der Zellwand in Acetylgruppen überführt und Essigsäure freigesetzt.

Auf dem Prinzip der Füllung der Zellholräume basiert die Modifizierung von Holz mit Öl und Wachs sowie aus Krabbenschalen gewonnenen Chitosan.

Das Einbringen von Melaminharz und anderen polymeren Substanzen bewirkt eine Blockierung der freien OH-Gruppen. Auf der gleichen Basis beruht die Herstellung von Polymerholz (siehe Kapitel 2.4.4.1).

Für die Holzvernetzung werden verschiedene Chemikalien eingesetzt, die ihren Ursprung in der Textilindustrie haben. Ein Beispiel dafür ist DMDHEU (dimethylol-dihydroxy-ethyleneurea). Dieser Stoff kann in die Holzzellwände eindringen, dort polykondensieren und für eine Quervernetzung sorgen. Die Zellwände werden dadurch in einem dauerhaft gequollenen Zustand fixiert. Die Quervernetzung führt gleichzeitig dazu, dass das Holz nicht mehr bis zur ursprünglichen Grösse quellen kann.

Furfurylalkohol ist eine erneuerbare Chemikalie, die aus hydrolysierten Biomasse produziert wird. Furfuryliertes Holz wird durch die Einbringung von veredeltem Furfurylalkohol hergestellt. Dabei handelt es sich um eine chemische Modifikation.

Bei der Modifizierung mit siliziumorganischen Verbindungen kommt es zwischen dem vierwertigen Siliziumatom und den freien Hydroxylgruppen der Zellulose zu funktionellen Gruppen, die im Holz bindend oder vernetzend wirken.

2.2.1 Thermische Behandlung von Holz

Die thermische Behandlung ist von allen Modifizierungsverfahren in Europa am weitesten entwickelt. Die Hitzebehandlung benötigt keine zusätzlichen chemischen Stoffe und kann mit relativ einfachen technischen Mitteln durchgeführt werden. Es werden keine aussergewöhnliche Bedingungen an das Ausgangsmaterial (Tränkbarkeit, Oberflächenbeschaffenheit) gestellt.

Bei der thermischen Vergütung von Holz wird durch einen physikalischen Vorgang (Wärmezufuhr), die Holzstruktur auf chemischer Ebene verändert, die je nach Höhe der Temperatur und Dauer der Behandlung sehr verschieden stark ausgeprägte Änderungen der physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften des Holzes bewirken [15] [61]. Bei der thermischen Modifikation werden die freien OH-Gruppen um- und abgebaut, wodurch das Wasser reduzierte Bindungsmöglichkeiten hat.

Die thermische Zersetzung von Holz wurde schon bei niedrigen Temperaturen beobachtet. So z. B. bei der Trocknung von englischer Eiche über 126 Tage bei 56° C [61]. Ab einer Temperatur von 200° C verläuft der thermische Abbau des Holzes deutlich sichtbar und erheblich schneller. Zwischen 260 und 290° C wird dann bei der trockenen Destillation des Holzes der Flammpunkt erreicht, von welchem die Verbrennung als exothermer Vorgang vor sich geht. Zurück bleibt als fester Rückstand Holzkohle und Asche.

2.2.1.1 Frühe wissenschaftliche Untersuchungen auf diesem Gebiet

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Untersuchungen durchgeführt, die eine Behandlung von Holz im Temperaturbereich über 100° C zum Inhalt hatten. Schon 1920 stellte Tiemann [88] die Dimensionsstabilität von Holz nach einer Hochtemperaturtrocknung fest. Allerdings wurde die thermische Modifikation von Holz erst Jahrzehnte später bewusst untersucht, so unter anderem von Stamm [83], der Holz in einem Bad aus flüssigem Metall erwärmte. Mit dem veränderten Sorptionsverhalten der modifizierten Hölzer beschäftigten sich Kollmann und Schneider [61]. In den folgenden Jahren erkannten die beiden auch den thermisch bedingten Abbau von Hemizellulose, Zellulose und Lignin, deren Zersetzung bei steigender Temperatur in dieser Reihenfolge beginnt. Die erhöhte Pilzresistenz wurde in den fünfziger Jahren von Buro [16] nachgewiesen, der die beobachtete geringere Ausgleichsfeuchte als Grund für die sinkende Wahrscheinlichkeit des Befalls erkannte.

2.2.1.2 Masseverlust

Bei der thermischen Behandlung kommt es je nach Intensität der Behandlung zu einem Masseverlust. Die Höhe des Masseabbaus ist von den Prozessparametern wie Behandlungsdauer, Temperatur und Druck abhängig. Einen sehr entscheidenden Einfluss hat auch die Atmosphäre, die das Holz während des Vergütungsprozesses umgibt. Einen weiteren Einfluss auf das Modifikationsergebnis haben auch die Holzart, die Geometrie der Proben und deren Anfangsfeuchte. Die thermische Behandlung führt bei einer Temperatur von 130° C zu einem deutlichen Abbau der Holzmasse [5] [53] [87]. Der thermische Abbau von Zellulose erfolgt zunächst in den amorphen Bereichen, bei den Hemizellulosen ab ca. 70° C. Beim Temperaturanstieg auf 130° C beginnt dann auch die Teilerzersetzung der Zellulose [15] [61]. Lignin besitzt die geringste Temperaturempfindlichkeit. Unterhalb von 200° C kommt es nach Burmester [15] zu einer Kondensation des Lignins, bei der thermisch weitgehend stabile Makromoleküle entstehen. Bei Temperaturen über 200° C werden aus Lignin verschiedene phenolische Produkte abgespalten. Kollmann und Schneider [61] berichten von einer Temperatur von 180° C, bei der Teile des Lignins thermisch abgebaut werden.

Die thermische Behandlung unter Anwesenheit von Sauerstoff führt zu einem höheren Masseverlust des Holzes, im Gegensatz zur Behandlung im Vakuum oder Stickstoffatmosphäre, wo kleinere Masseverluste auftreten. Dies ist auf die stark oxidierende Wirkung des Sauerstoffes zurückzuführen, der die auftretenden chemischen Reaktionen verstärkt und beschleunigt.[5] [15] [53] [61] [87]

Die thermische Zersetzung bei der hydrothermischen Behandlung (Behandlung unter Anwesenheit von Wasser) ist grösser als bei der thermischen Behandlung in Luftgasatmosphäre. Die Aktivierungsenergie für die Zersetzungsreaktionen ist bei trockener Erhitzung nur etwa halb so gross wie unter Einwirkung von Feuchtigkeit [15] [61]. Auch ist die thermische Zersetzung in einem abgeschlossenen System bei Anwesenheit von Wasser grösser als in einem System, in dem die flüchtigen Produkte entweichen können. In einem geschlossenen System können sich die entstehenden Säuren zu immer höher konzentrierten Lösungen akkumulieren, die bei den hydrolytischen Vorgängen als Katalysator wirken.[61]

2.2.1.3 Sorption / Quellung und Schwindung

Infolge der thermischen Zersetzung der Holzbestandteile ändern sich auch die Sorptions- und Quelleigenschaften von Holz. Da der Abbau bzw. die Umwandlung der Hemizellulose, Zellulose und des Lignins die Anzahl der reaktiven OH-Gruppen verringert, können auch weniger Wassermoleküle gebunden werden. Mit der geringeren Menge aufgenommenen Wassers bei gleicher Luftfeuchte und Temperatur weisen thermisch modifizierte Hölzer eine verbesserte Dimensionstabilität auf.

Die chemischen Hauptbestandteile sind nach Burmester [15] in folgender Weise an der Sorption beteiligt: Die Hemizellulose ist wegen ihrer starken hydrophilen Eigenschaft und ihres relativ hohen Anteils an den Zellwandbestandteilen der Hauptträger der Sorption. Die Neigung der Zellulose zur Kristallisation und damit die Absättigung grosser Anteile ihrer freien OH-Gruppen schränkt ihre hydrophile Eigenschaft ein. Lignin, das grösstenteils in der Mittellamelle eingelagert ist, sorbiert nur geringfügig und blockiert dort wo es Polysaccharide umschliesst deren sorptives Verhalten.

Durch eine steigende Behandlungstemperatur und Behandlungsdauer ist eine Abnahme des Sorptionsvermögens und den damit verbundenen Schwind- und Quellwerte auf bis zu 50 % zu verzeichnen. Im Bereich der Chemisorption, das heisst bei niedrigen Luftfeuchtigkeiten, ist die Abnahme des Sorptionsvermögens am grössten. Im Bereich der Kapillarkondensation hat die Hitzebehandlung auf das Sorptionsvermögen nur einen geringen Einfluss.[15]

Die Wirkung der thermischen Behandlung auf das Sorptionsverhalten vergrößert sich im positiven Sinne, wenn die Erhitzung in einem geschlossenen System nach der Verdichtung des Holzes erfolgt. Dadurch, dass die Zelllumina geschlossen werden, müssen die gasförmigen Reaktionsprodukte innerhalb der Zellwand selbst verbleiben, wo sie zu harzartigen Stoffen kondensieren. Die Kondensation der gasförmigen Reaktionsprodukte zu Makromolekülen und harzähnlichen Körpern hat einen hydrophoben Charakter.[15]

2.2.1.4 Pilzresistenz

Hitzebehandeltes Holz hat eine gesteigerte Resistenz gegenüber Pilzen. Durch die thermische Behandlung wird der kristalline Anteil der Zellulose erhöht [56]. Diese Erhöhung der kristallinen Anteile gegenüber den amorphen hat zur Folge, dass die Zellulose für Pilze weniger gut abbaubar wird. Pilze brauchen für ihr Wachstum eine Mindestfeuchtigkeit, die durch die verminderte Gleichgewichtsfeuchte möglicherweise unterschritten wird. Auch werden die Zuckermoleküle umgewandelt und möglicherweise werden durch die thermische Behandlung toxische Nebenprodukte produziert.[5]

2.2.1.5 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften hängen direkt von der Dichte ab. Diese nimmt durch die thermische Vergütung ab. Da die Dichte Quotient aus Masse und Volumen ist, muss der Volumenrückgang im Gegensatz zum Masserückgang kleiner sein. Der Volumenverlust beruht teilweise auf einer Volumenverringern der Zellumina. Prüfungen von Kamdem et al. [55] ergaben, dass die Hitzebehandlung einen Rückgang der Biegefestigkeit um 10 bis 50 % verursachen kann. Die Öl-Hitzebehandlung erhöht den Biegeelastizitätsmodul leicht [78]. Dagegen wurden in Untersuchungen verschiedener Autoren Festigkeitsverluste und erhöhte Sprödigkeit von hitzebehandelten Proben festgestellt [15] [61] [55]. Die Festigkeitsverluste bei dynamischer Belastung sind aufgrund der Holzveränderungen durch Temperaturen um 220° C relativ gross, so dass die Verwendung für tragende Bauteile oftmals eingeschränkt ist. Wie Burmester [15] zeigt, können die Festigkeitseigenschaften im Gegensatz zu drucklosen Verfahren durch Anwendung von Wärme und Druck verbessert werden. Dies führte Burmester [15] auf eine intensive Wärmeeinwirkung in einem kurzen Zeitraum bei Systemen mit höherem Druck zurück.

Einige Thermoholzhersteller, wie sie in Kapitel 2.3.1 vorgestellt werden, versichern eine Zunahme der Härte infolge der thermischen Behandlung. Jedoch stützten sich diese Aussagen nicht auf wissenschaftliche Untersuchungen.

2.2.1.6 Holzfarbe

Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Farbgebung sind die Behandlungsdauer, die Behandlungstemperatur, die Holzfeuchte und Umgebungsfeuchte im Behandlungsraum. Bei der thermischen Behandlung ist vor allem die Temperatur – Feuchtigkeit – Verfärbung, auch T-u-Verfärbungen genannt, Verursacher der Verfärbung. Diese Verfärbung entsteht durch Einwirkung von Wärme und Feuchtigkeit auf das Holz.[60]

Gerbstoffe und Farbstoffe sind wahrscheinlich bei einigen Hölzern an den T-u-Verfärbungen beteiligt. Sie sind häufig schon im Baum farbig und können ihr Aussehen durch Wärmeeinwirkung ändern. Ihre Bedeutung scheint aber gering zu sein, da sich gerbstoffarme Hölzer wie Buche und Ahorn besonders stark verfärben.

Das Lignin bietet sich vor allem deshalb als farbverursachende Komponente an, weil isolierte Lignine mehr oder weniger braun sind. Auch der Hemizellulose kommt bei der Verfärbung von Holz eine wichtige Rolle zu, da sie gegenüber hohen Temperaturen unbeständig ist. [60]

Die Isolierung des Lignins wird unter Einfluss von hoher Temperatur und Wasser durch die Hydrolyse der Lignin-Kohlenhydrat-Bindung ausgelöst. Die Spaltung der Lignin-Kohlenhydrat-Bindung geht unter dem Einfluss von Säuren schneller vor sich. Das isolierte Lignin besitzt eine braune Färbung. Die Verfärbung der Hemizellulose ist auf die Hydrolysevorgänge der Pentosane zurückzuführen. Die Pentosane werden zunächst zu Pentosen hydrolysiert. Durch die weitere Erhitzung der Pentosen mit Säuren werden diese zu Furfurol und dunkel gefärbten Harzen abgebaut [60]. Auch der Holzzucker hat möglicherweise einen Einfluss auf die Farbgebung. Bekanntlich verfärbt sich der Zucker bei der Erhitzung. Er wird unter Einwirkung von Wärme karamellisiert und bekommt eine braune Farbe.

Würde man einer Behandlung Säure zuführen so würde sich das Holz noch stärker Verfärben. Die intensiveren Verfärbungen der Laubhölzer gegenüber den Nadelhölzern dürften neben dem höheren Pentosangehalt auch mit der stärkeren Säureentwicklung dieser Holzartengruppe zusammenhängen.

Die Dunkelfärbung von Holz ist nach Kollmann [59] unter Temperatureinwirkungen in den ersten fünf bis 10 Stunden am stärksten. Je höher die Temperatur ist, umso dunkler verfärbt sich das Holz. Gering ist die Verfärbung bis 70° C, mässig zwischen 70 und 140° C und stark über 140° C.

Informationen über einen allfälligen Farbegalisierungseffekt zwischen Farbkern und Splint durch die thermische Behandlung lagen in der untersuchten Literatur nicht vor.

2.2.1.7 UV-Beständigkeit

Untersuchungen von Bächle [5] haben gezeigt, dass thermisch behandeltes Holz gegen das Vergrauen durch die natürliche Bewitterung nicht beständig ist. Es unterliegt diesem Prozess gleich stark sowie gleich schnell wie unbehandeltes Holz.

2.3 Industrielle Anwendung von thermisch vergütetem Holz

2.3.1 Marktübersicht

Seit ca. zehn Jahren wird thermisch vergütetes Holz in Europa industriell produziert. Die industrielle Produktion ist auf relativ wenige kleinere Anlagen beschränkt, welche über eine Produktionskapazität von 150 bis 10000 m³ verfügen. Schon einen gewissen Bekanntheitsgrad in der Branche haben die Verfahren von Stellac (Finnland), VTT (Technisches Forschungszentrum Finnland Helsinki), Plato (Niederlande), Now-retification (Frankreich), Mühlböck (Österreich), Menz (Deutschland), Bikos (Russland) und Balz (Schweiz). [30]

Tabelle 2: Technologieentwickler von thermischen Vergütungsprozesse, deren Verfahren und produzierte Menge nach Ewert [30]

Technologie-Entwickler	Anzahl Produzenten	Produzierte Menge 2003 [m ³]	Verfahren
Stellac (FI)	5	21100	Heissluft-Wasserdampf-Verfahren
VTT (FI)	8	12970	Heissluft-Wasserdampf-Verfahren
Plato (NL)	1	4000	Feucht-Wärme-Druck-Verfahren
Now-retification (F)	7	2400	Inertgas-Verfahren
Mühlböck (A)	2	2250	Heissluft-Verfahren
Menz (D)	1	250	Öl-Hitze-Verfahren
Bikos (RUS)	1	150	Heissluft-Verfahren
Balz (CH)	1	3000 ¹⁾	Inertgas-Verfahren (Stickstoff)

1) Jahreskapazität

Die vergleichsweise preiswerten Verfahren sind diejenigen, die allein mit Heissluft als Wärmeübertrager arbeiten. Hierzu zählen die Stellac-, VTT-, Mühlböck-, und die Bikos-Technologie. Die Produkte dieser Verfahren werden im Innen- sowie auch im Aussenbereich erfolgreich eingesetzt. In Finnland sieht man für diese Produkte ein Zukunftspotential insbesondere im Bereich der Fussbodenbeläge und der Fensterherstellung [34] [49]. In Österreich errichtete die Firma Mühlböck bisher zwei Heissluftanlagen, für den Parketthersteller Mafi 2001 und für das Rotbuchensägework Mitteramskogler im Jahre 2002. Es wird momentan vor allem Laubholz für die Parkettfertigung veredelt.

Die ersten industriellen Anlagen wurden 1998 von Stellac Wood Oy in Finnland in Betrieb genommen. Heute besitzt Finnland einen Anteil an der europäischen Produktion von Thermoholz von ca. 80 %.

Um gemeinsam am Markt zu agieren, gründeten alle finnischen Thermoholzproduzenten, Anlagehersteller und Entwickler die Finnish Thermowood Association (FTA). Die FTA hält verschiedene Patente des VTT und den Markennamen ThermoWood. Den restlichen Europabedarf an thermisch behandeltem Holz decken mitteleuropäische Unternehmen. Im europäischen Raum werden zurzeit ca. 45000 m³ thermisch vergütetes Holz pro Jahr hergestellt. [30]

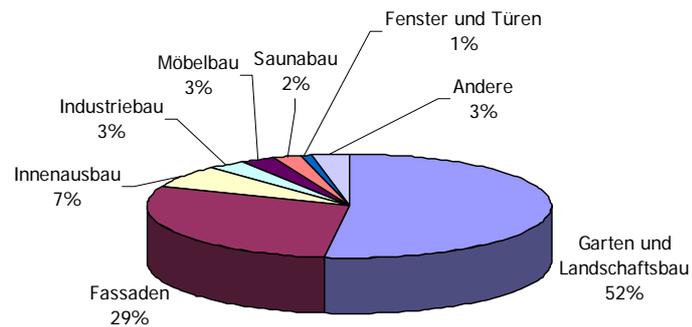


Diagramm 1: Einsatzgebiete und deren Anteil von thermisch behandeltem Holz in 2003 Europa [30]

Im Aussenbereich wird thermisch vergütetes Holz vor allem im Garten- und Landschaftsbau, für Fassadenverkleidungen und Schallschutzwände eingesetzt. Hauptsächlich kommen hier Nadelhölzer zum Einsatz. Eine weitere Aussenanwendung, in der die Hersteller in Zukunft ein grosses Potential sehen, ist die Herstellung von Fenstern und Aussentüren aus thermisch behandeltem Holz.

Im Innenbereich wird vor allem die dunkle Farbe des thermisch vergüteten Holzes geschätzt. So kommt es im Fussbodenbereich, bei Wand- und Deckenverkleidungen, im Möbelbau und im Saunabau zum Einsatz. Speziell im Fussboden- und Möbelbereich kommen Laubhölzer zum Einsatz.

2.3.2 Verfahren

Die für das Heissluft-Verfahren eingesetzten Anlagen ähneln einer Trockenkammer (siehe Abbildung 5). In der Aufheizphase wird das mit Stapelleisten gestapelte Holz zunächst getrocknet. Je nach Verfahren wird nach der Aufheizphase keine oder eine bestimmte Menge Wasserdampf eingeblasen. Durch das Einbringen von Wasserdampf wird die Umgebungsluft und somit der darin enthaltene Sauerstoff weitgehend entfernt, so dass während der eigentlichen Behandlung bei 150 bis 250° C das Holz nicht zu stark oxidieren (verbrennen) kann. Weiter beeinflusst der Dampf die chemischen Veränderungen und erhöht die Wärmeübertragung. Die Gesamtprozessdauer beträgt ein bis drei Tage. Bevorzugt wird in diesem Prozess bereits getrocknetes Holz. Aufgrund des Anlagentyps kann feuchtes Holz jedoch problemlos am Anfang des Prozesses vorgetrocknet werden. Dies wiederum erhöht die Gesamtprozessdauer. Die bei der Behandlung entstehenden Gase können aufgefangen, verbrannt und dadurch thermisch für den Vergütungsprozess genutzt werden. Durch das ständige Abführen der Pyrolysegase ist nach der Behandlung mit dem Heissluftverfahren kaum ein unangenehmer Holzgeruch wahrnehmbar.[1] [34]

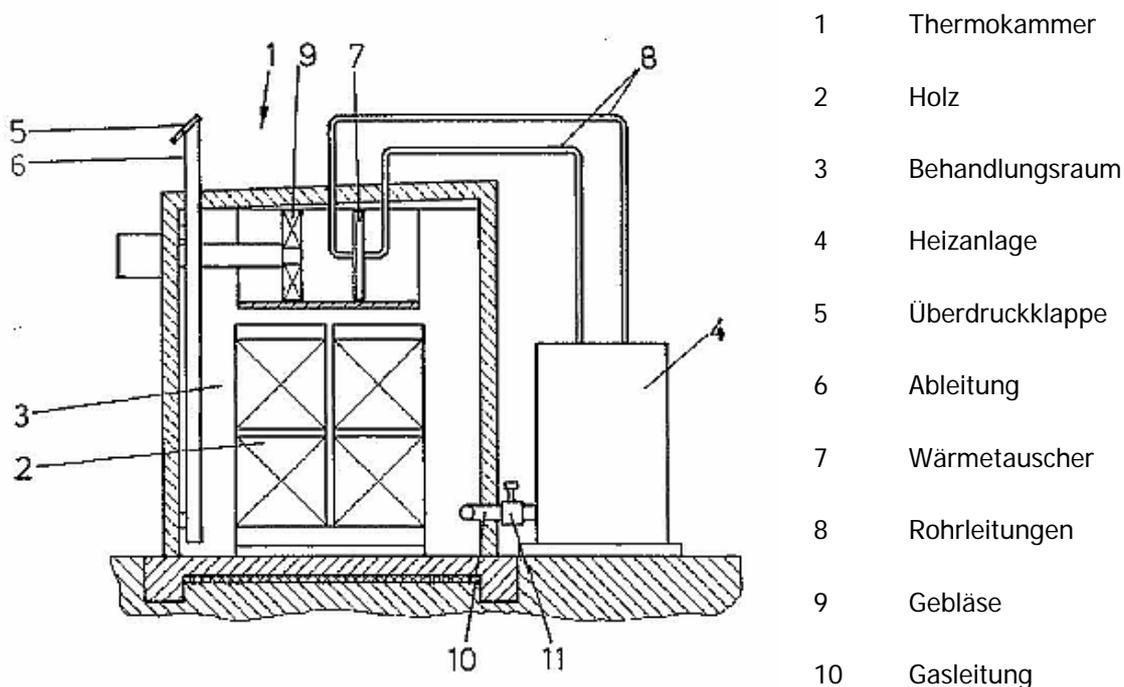


Abbildung 5: Thermokammer der Firma Mühlböck [45]

Die Plato-Technologie basiert auf dem Feucht-Wärme-Druck-Verfahren [15]. Die Rechte für die Herstellung von Plato-Holz gehören der niederländischen Firma Nieuw Hout. Als mögliche Anwendungsgebiete werden neben dem Gartenbau mit Pergolen, Zäunen und Stützpfehlen (mit Erdkontakt) auch Fenster, Türen und Fussböden sowie Verkleidungen für Aussenfassaden genannt.

Das Feucht-Wärme-Druck-Verfahren ist ein mehrstufiger Prozess. In der ersten Phase wird das Holz für vier bis fünf Stunden bei 150 bis 200° C unter Satttdampf oder im Wasser behandelt. Dies geschieht unter hohem Druck bei acht bis zehn bar in einem geschlossenen Druckkessel. Anschliessend wird das Holz in einer Trockenkammer in drei bis vier Tagen auf ca. 10 % Holzfeuchte heruntergetrocknet. Weiter wird das Holz in der so genannten Härtingsphase erneut für 14 bis 16 Stunden bei 170 bis 190° C behandelt. Das Heizmedium kann Heissluft oder Dampf sein. Als Ausgangsmaterial wird saftfrisches Holz empfohlen. Bereits getrocknetes Holz wird in der ersten Phase angefeuchtet.[34] [46]

Die Firma Menz-Holz aus Deutschland ist bisher das einzige Unternehmen, das im industriellen Massstab die Öl-Hitzebehandlung einsetzt. Die Fertigprodukte aus Öl-Hitze behandeltem Holz sind vor allem für den Gartenbereich ausgelegt. Beim Öl-Hitze-Verfahren wird das zu behandelnde Holz in Pflanzenöl getaucht und im Ölbad langsam auf 180 bis 220° C aufgeheizt. Die eigentliche Behandlungsdauer beträgt zwei bis vier Stunden. Die Behandlung findet unter Ausschluss von Sauerstoff statt. Das Öl, mit einem Siedepunkt deutlich über den Behandlungstemperaturen, begünstigt einen schnellen und gleichmässigen Temperaturanstieg im Holz. Die während der Behandlung austretenden Gase verhindern weitgehend die Aufnahme von Öl. Erst durch den beim Abkühlen des Tränggutes im Ölbad entstehenden Unterdruck im Holz wird Öl aufgenommen. Bei Bedarf kann die Ölaufnahme jedoch durch die Veränderung der Prozessparameter erheblich gesteigert werden. Die Gesamtdauer beträgt ca. einen Tag. Für die Öl-Hitzebehandlung wird getrocknetes Holz eingesetzt. Der mehr oder weniger starke Geruch des Öl-Hitzebehandelten Holzes hat einen Einfluss auf die Verwendungsmöglichkeit. So kommt dieses Verfahren zurzeit nur im Garten- und Landschaftsbau zum Einsatz.[34] [43]

Das Inertgas-Verfahren wird mehrheitlich von Französischen Firmen angewendet. Das behandelte Holz wird unter dem Produktnamen Bois Retifié oder Retified Wood gehandelt. Die Rechte, die im Zusammenhang mit Bois Retifié stehen, werden von der NOW S.A. (New Option Wood SA) gehalten. Bois Retifié findet im Innen- und Aussenbereich Anwendung. Hergestellt werden Aussenverkleidungen für Fassaden und Lärmschutzwände, Aussenbeläge im Gartenbereich, sowie Küchen- und Badmöbel.[47] Das auf ca. 12 % Holzfeuchte vorgetrocknete Holz wird in einer Stickstoffatmosphäre mit einem Restsauerstoffgehalt unter zwei % acht bis zehn Stunden bei einer Temperatur zwischen 210 und 240° C vergütet. Das geschieht in einer speziellen Druckkammer, da für den Prozess Unter- und Überdruck benötigt wird. Während die Anwesenheit eines Oxidationsmittels (z.B. Sauerstoff) bei der Behandlung den Masseabbau der Holzsubstanz stark beschleunigt und diesen dadurch sehr schwer kontrollierbar machen würde, ermöglicht die Stickstoffatmosphäre eine bessere Steuerung des Behandlungsprozesses. Da die Vergütung in einem geschlossenen System vorgenommen wird, können die Emissionen nicht unmittelbar bei der Entstehung abgeführt werden. Diese Emissionen und vermutlich auch der Stickstoff haben einen Einfluss auf die Geruchsbildung des thermisch vergüteten Holzes. So weist das so behandelte Holz einen typischen, gut wahrnehmbaren Geruch auf.

Die Firma Balz in Langnau im Emmental stellt als derzeit einzige in der Schweiz thermisch vergütetes Holz her. Die Firma vergütet Holz im Autoklav in Stickstoffatmosphäre (siehe Abbildung 6). Behandelt wird mit Überdruck. Temperatur, Zeit und Druck werden je nach Vergütungstiefe variiert. Die Wärmebehandlung erfolgt im Kundenauftrag. Behandelt wird Nadelholz zunehmend aber auch Laubholz wie Buche, Esche, Ahorn und Ulme.[37]



Abbildung 6: Autoklav für die thermische Behandlung in Stickstoffatmosphäre der Firma Balz AG

2.4 Parkettindustrie

2.4.1 Parkett

Zu den Holzfussböden gehören Parkett, Massivholzdielen und Holzpflaster. Sie können unter anderem nach ihren technischen Eigenschaften und den am häufigsten eingesetzten Holzarten charakterisiert werden.

Parkett ist als ein Holzfussboden, der aus Parkettstäben, Parketriemen, Tafeln für Tafelparkett, Mosaikparkettlamellen oder industriell hergestellten Fertigparkett-Elementen besteht, definiert.[21]

Heute haben folgende Parkettarten wirtschaftliche Bedeutung:

- Mosaikparkett
- 10-mm-Massivparkett
- Stabparkett
- Fertigparkett (Mehrschichtparkett)

Die erwähnten Parkettarten sind im Kapitel A 2 des Anhangs beschrieben.

2.4.2 Wirtschaftliche Lage der Parkettindustrie

Der Parkettverbrauch ist seit dem Rekordjahr 2000 leicht rückläufig. In Deutschland sowie auch in der Schweiz ist das mit dem Rückgang im Wohnungsbau zu begründen. Was der Inlandproduktion am meisten zu schaffen macht, sind die höheren Importraten und niedrigeren Exportzahlen. So ist zum Beispiel in der Schweiz die Inlandproduktion 2003 um 24 % zurückgegangen. Der Import stieg um 11.7 % [8]. Der Mengen- und Preisdruck aus den Billiglohnländern, insbesondere aus Osteuropa, macht eine konkurrenzfähige Herstellung für diese Produkte im Inland immer schwieriger. Somit ist in den kommenden Jahren mit weiteren Produktionsverlagerungen ins Ausland zu rechnen.

Daher könnte durch die Produktion besonders hochwertiger Sortimente ein Beitrag zur Wertschöpfung im Inland erreicht werden.

Bezogen auf die einzelnen Parkettarten ergeben sich deutliche Unterschiede im Inlandverbrauch. Während das einschichtige Massivparkett Rückgänge zu verzeichnen hat, nimmt der Anteil von Mehrschichtparkett weiter zu. So rechnet der vdp (Verband der Deutschen Parkettindustrie) [89] 2005 in Deutschland für Stabparkett mit einem Rückgang von 13 %, bei Mosaikparkett soll der Rückgang sogar 32 % betragen. Für den Absatz von Mehrschichtparkett geht der vdp von einer Steigerung des Inlandverbrauchs für Deutschland um 7 % aus. Eine ähnliche Situation spielt sich in der Schweiz ab.

2.4.3 Anforderungen an den Rohstoff

Für die Parketherstellung kommen neben der Eiche vor allem die Holzarten Buche, Ahorn, Esche, Erle sowie Kirschbaum und Birke zum Einsatz. Durch das Interesse an dunkleren und sehr harten Hölzern ist auch der Verbrauch von einigen tropischen Holzarten in letzter Zeit gestiegen. Bezogen auf alle Parkettarten nimmt Eiche mit 44 % den grössten Anteil ein, gefolgt von Buche mit ca. 31 %. Auf Ahorn entfallen 11 bis 12 % und auf Esche und die tropischen Holzarten jeweils 2 bis 3 %. Kirschbaum und Birke haben einen Anteil von 1 bis 2 %. Alle anderen Holzarten liegen unter einem Prozent.[89]

An das Parkett werden hohe Forderungen gestellt. Folgende Eigenschaften haben einen grossen Einfluss auf die Verwendung von Parkett:

- Härte
- Verschleissverhalten
- Dimensionsstabilität
- Erscheinungsbild

Eine wichtige Messgrösse für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Punktbelastungen (z.B. Absätze von Frauenschuhen) ist die Brinellhärte. Sie ist insbesondere von der Dichte abhängig. Eiche, Buche und Esche weisen unter den einheimischen Laubhölzern die höchste Härte auf. Viele exotische Holzarten übertreffen die einheimischen Holzarten in der Härte. Dies führt zum vermehrten Einsatz dieser Holzarten in der Parkettindustrie.

Die Verschleissfestigkeit von Holz ist ebenfalls von der Dichte abhängig. Man muss allerdings bei Parkett zwischen der Verschleissfestigkeit des Holzes und der Abriebfestigkeit der Oberflächenbehandlung (Versiegelung) unterscheiden. Die Oberflächenbehandlung ist ausschlaggebend für die Dauerhaftigkeit der Oberfläche bei Parkett. Die Art der Versiegelung muss sich deshalb nach der Beanspruchung richten. Heute gibt es Versiegelungssysteme für alle Beanspruchungsgruppen. Der Verschleiss von Böden in öffentlichen Gebäuden ist durch den Publikumsverkehr viel höher als z. B. in einem Schlafzimmer.

Das Schwinden und Quellen des Holzes beeinflusst die Fugenbildung von Parkett. Der Feuchtigkeitsgehalt der Fertigparkettelemente liegt nach der Norm [24] bei 8 % mit einer Toleranz von ± 2 %. Vor allem während der Heizperiode kommt es oft zu unerwünschten Fugenbildung durch das Schwinden der Lamellen. Um ein möglichst kleines Schwinden zu erhalten, empfehlen die Hersteller während der ganzen Heizperiode die relative Raumluftfeuchtigkeit nicht unter 45 % fallen zu lassen. Dies kann nur mit einer zusätzlichen Raumluftbefeuchtung erreicht werden und gilt für jedes Heizsystem. Auch sollte die maximale Oberflächentemperatur des fertigen Parkettbodens den Wert von 26 bis 27° C nicht überschreiten.[52]

Das Erscheinungsbild ist von der Parkettart, der Verlegeart, der Holzstruktur und der Holzfarbe abhängig. Vor allem die Farbe unterliegt schnell wechselnden Marktbedürfnissen und wird vom Verbraucher oft als entscheidendes Kriterium für einen Parkettboden betrachtet. Im verlegten Zustand sollte die Farbe stabil sein. Man spricht auch von Farbstabilität. Infolge UV-Einstrahlung des Sonnenlichtes ändert sich die Farbe des Holzes. Dies hängt von den Holzinhaltstoffen und anderen Faktoren ab. Durch pigmentierte Versiegelungssysteme versucht man die Farbstabilität des Parketts zu erhöhen.

2.4.4 Einsatz von modifiziertem Holz für Parkett

Der Einsatz von modifiziertem Holz für Parkett gewinnt in jüngster Zeit immer mehr an Bedeutung. Damit versucht man die oben genannten Eigenschaften um ein Vielfaches zu verbessern. Als Hauptkriterium für die Modifizierung gilt es die Härte, die Dimensionsstabilität und die Verschleissfestigkeit zu verbessern sowie die Holzfarbe zu beeinflussen.

2.4.4.1 Polymerholz für Parkett

Schon seit längerer Zeit findet man auf dem Markt Parkett aus Polymerholz (z.B: Denspark der Firma Bauwerk). Die Ausgangsbasis von Polymerholz ist natürliches Holz. Das Holz wird mit Kunststoffmonomeren durch ein spezielles Tränkungsverfahren getränkt. Dabei werden die Zellhohlräume mit dem Kunstharz gefüllt. Anschliessend werden die Kunststoffmonomeren durch Wärme oder ionisierende Strahlen zu Makromolekülen ausgehärtet [70]. Das Polymerholz zeigt ein vermindertes Quell- und Schwindverhalten. Der Angriff von Mikroorganismen wird nahezu verhindert. Die mechanischen Eigenschaften, vor allem die Oberflächenhärte wird stark erhöht. Dabei soll keine optische Beeinträchtigung des Holzes stattfinden und das natürliche Erscheinungsbild des Holzes soll erhalten bleiben. Durch die Tränkung der Deckschicht über den ganzen Querschnitt kann der Parkettboden renoviert, d. h. geschliffen werden ohne dass sich die Farbe und Struktur des Parkettbodens verändert. Das Harz kann auch eingefärbt zum Einsatz kommen. So sind der Farbgebung durch diese Modifikation fast keine Grenzen gesetzt. Solche modifizierten Parkettarten kommen in stark beanspruchten Bereichen zum Einsatz, wie z.B. Einkaufsläden, Museen, usw.

Die Tränkung von Holz mit Kunstharz ist mit einigen Problemen behaftet. So lässt sich zum Beispiel nicht eine komplette Ausfüllung der Holzräume mit dem Flüssigharz erzielen. Vor allem Markstrahlen und grosse Gefässe bei Ringporigen Hölzer werden nur unvollständig gefüllt. Dies wirkt sich negativ auf die Dimensionsstabilität aus. Die Härte kann hingegen verdreifacht werden. Dadurch wird die Verschleissfestigkeit und somit die Lebensdauer deutlich verbessert.[80]

Für die Parketherstellung werden Buche, Esche und kanadischer Ahorn modifiziert. Speziell gut lässt sich die Buche Einfärben.[80]

2.4.4.2 Thermisch behandeltes Holz für Parkett

Thermisch behandeltes Holz findet heute im Parkettbereich bereits Anwendung. So werden in Österreich, Deutschland und vor allem in Finnland Fertigparkett, Landhaus- und Massivholzdielen aus thermisch behandeltem Holz gefertigt. Thermisch behandelt werden unter anderem Buche, Birke, und Esche aber auch Kiefer, Fichte und Lärche kommen thermisch vergütet im Holzbodenbereich zum Einsatz.

In erster Linie will man durch die thermische Behandlung einen dunklen Farbton erreichen, der sich über den ganzen Querschnitt der Decklage erstreckt. Die durchgehende Verfärbung ermöglicht ein unproblematisches Nachschleifen und abfräsen bei Renovationen. Auch Kappstellen und Bohrungen haben dieselbe Farbe. Somit wird eine Nachbearbeitung zur Farbegalisierung überflüssig. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verbesserung der Dimensionsstabilität. Vor allem bei Holzarten mit hohen Schwind- und Quellmassen (z.B. Buche), kommt es während der Heizperiode vermehrt zu Fugenbildung. Die Hersteller von thermisch behandeltem Parkett heben vor allem die ökologischen Aspekte hervor. Thermisch behandeltes Holz hat weder bei der Produktion noch im Gebrauch negative Auswirkungen auf die Umwelt. Das Holz wird ohne die Zufuhr von Chemikalien und Farbstoffen behandelt. Es kann, sofern es die Oberflächenbehandlung zulässt, wie natur belassenes Holz entsorgt werden.

Oft wird thermisch behandeltes Holz als Tropenholzersatz angeboten. Durch die thermische Behandlung einheimischer Hölzer können dunkle Farbtöne und eine erhöhte Resistenz, wie das bei tropischen Hölzern vielfach der Fall ist, erreicht werden. Nach Angaben einiger Hersteller von thermisch behandeltem Holz liegt der Preis weit unter dem von importierten Tropenhölzern gleicher Qualität.

Als problematisch für die Parketthersteller gilt die Nachhaltigkeit der Lieferung von Tropenholz sowie die Planbarkeit der Produktion. Tropenhölzer kommen zum Grossteil unregelmässig, unverlässlich und in unterschiedlichen Qualitäten, Farben und Sortierungen aus den Exportländern. Auch Kursschwankungen auf den Finanzmärkten spielen hier eine wesentliche Rolle. Ebenfalls Aktivitäten von Umweltaktivisten, welche ganze Schiffsladungen verzögern machen der tropenholzverarbeitenden Parkettindustrie zu schaffen.

Eingesetzt wird thermisch behandeltes Holz auch in der Altbausanierung als künstlich gealtertes Holz. Fussbodenbeläge, Wand- und Deckenverkleidungen erhalten in Kombination mit anderen Behandlungen, wie z. B. das Sandstrahlen, ein rustikales oder gealtertes Erscheinungsbild.

Beim Einsatz von Thermoholz als Parkett ist die Veränderung der mechanischen Eigenschaften zu beachten. Speziell die Härte darf durch die Behandlung nicht negativ beeinflusst werden. Es gibt Hersteller, die eine Erhöhung der Härte durch die thermische Behandlung versichern. Jedoch nimmt die Härte ab einem gewissen Punkt der thermischen Behandlung ab. Das gleiche gilt für die Biegefestigkeit, die bei Massivholzdielen von Interesse ist.

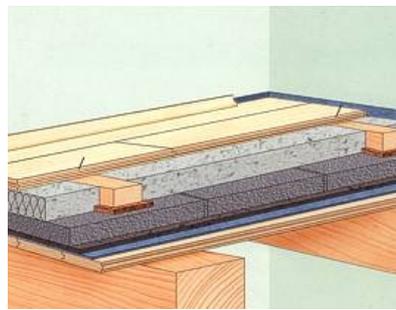


Abbildung 7: Aufbau eines Holzbodens mit Massivholzdielen [52]

Massivholzdielen werden nicht vollflächig auf den Untergrund verlegt. Sie werden auf Zwischenlatten, die bestimmte Abstände haben, angebracht (vgl. Abbildung 7). Demnach werden die einzelnen Elemente auf Biegung beansprucht. Bei der Befestigung der Elemente empfehlen die Hersteller, dass vorgebohrt werden muss. Die Hersteller weisen auf eine erhöhte Sprödigkeit von thermisch behandeltem Holz hin. Ansonsten liegen der Verarbeitung keine Einschränkungen vor.

Vollholzdielen, die über Bodenheizungen verlegt werden, müssen durch die erhöhte Dimensionsstabilität von thermisch behandeltem Holz nicht mehr im Dreischichtverfahren abgesperrt werden.

3 Begriffserklärung

Formeln die zum Verständnis der Begriffe dienen sind im Kapitell 4.4 aufgeführt.

3.1.1 CIE L*a*b-Farbsystem

Die Änderung von Farbton, Farbsättigung und Helligkeit lassen sich photometrisch durch die Anwendung des CIE- Masssystems („Commission Internationale de l'Eclairage“) exakt bestimmen. Das Verfahren wurde auch im vorliegenden Projekt angewandt. Der L*a*b-Farbraum wurde 1976 von der Commission Internationale d'Eclairage (CIE) [38] verbessert und zur internationalen Norm in der Farbmessung erklärt.

L* gibt die Luminanz (Helligkeit), a* den grün-rot und b* den blau-gelb Wert an. Die Vorzeichen lassen die Farbrichtungen erkennen: +a* deutet auf einen Rotanteil hin, -a* zeigt in Richtung Grün. Dementsprechend steht +b* für Gelb und -b* für Blau. L* ist immer positiv. Der Nullpunkt (schwarz) liegt unten an der Kugel (Siehe Abbildung 8). Oben, bei 100, liegt Weiss. Beim Kreuzungspunkt der a*, b* und L*-Achse befindet sich ein neutrales Grau ohne jede Buntheit.

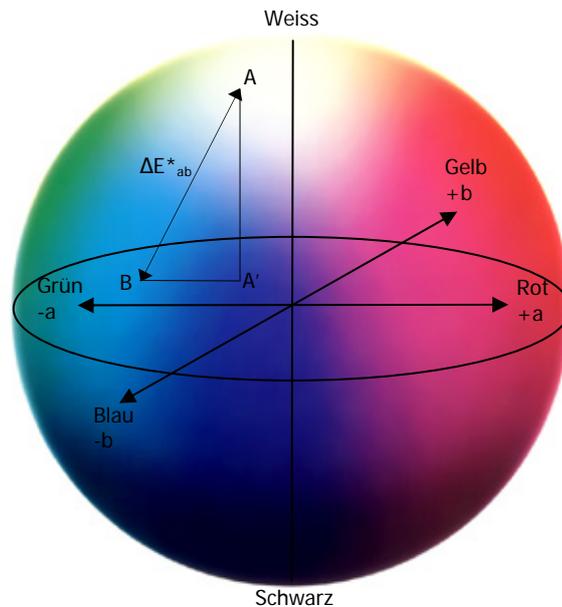


Abbildung 8: CIE L*a*b Farbraum, a und b stellen Farbwerte in Rot-Grün-Richtung bzw. Blau-Gelb-Richtung dar. L steht für die Helligkeit. ΔE^*_{ab} ist der geometrische Abstand zweier Farben im L*a*b*-Farbraum [38]

3.1.2 Witterungsbeständigkeit von Holz

Das Klima beeinflusst entscheidend die Witterungsbeständigkeit des Holzes. Von massgeblicher Bedeutung sind die UV-Strahlung, die Temperatur beziehungsweise der Temperaturwechsel sowie Niederschläge und die sich ändernde Luftfeuchtigkeit. Durch das Zusammenwirken dieser Faktoren wird das Holz strukturell abgebaut. Die abgebauten Holzbestandteile ausgewaschen, die Rauigkeit der Oberfläche steigt. Es entsteht eine rissige, raue und graue Oberfläche. Man spricht auch von der Erosion des Holzes.

Wird das Holz im Innenbereich eingesetzt, so fallen die Einflussfaktoren Wasser und starke Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderungen weg. Das Holz wird somit nicht mehr erodiert. Die Alterung des Holzes zeichnet sich lediglich über die Farbänderung durch die UV-Bestrahlung ab.

Die elektromagnetischen Wellen der Sonne lösen einen chemischen Abbauvorgang (Polymerzerersetzung) im Holz aus. Dieser bewirkt eine Farbänderung der Holzoberfläche. Ausgelöst werden die Verfärbungen vor allem durch UV-Strahlung. Auch wenn nur 5 % des zur Erde kommenden Lichts UV-Strahlung ist, sind wegen der hohen Quantenenergien diese kurzwelligigen Strahlungsanteile des gesamten Sonnenlichtes von entscheidender Bedeutung. Der sichtbare Anteil der Sonnenstrahlung macht 45 % bei einer Wellenlänge von 400 bis 800 Nanometer aus und die restlichen 50 % macht die Infrarotstrahlung aus (800 – 2480 nm). Innerhalb der UV-Strahlung sind die kürzeren Wellenlängen wesentlich wirkungsvoller und deshalb von stärkerem Einfluss als die längerwelligen UV-Strahlen. Die UV-Strahlung greift sämtliche Holzkomponenten an, jedoch wird der Abbau der Zellulose durch die Anwesenheit von Lignin verzögert. Lignin absorbiert ungefähr 80 – 95 % der UV-Strahlung, welche auf das Holz trifft. Das Lignin wird depolymerisiert. Depolymerisiertes Lignin ist dunkelbraun und wasserlöslich. Auch verschiedene Holzinhaltstoffe werden durch die Bestrahlung chemisch und dadurch auch farblich verändert. [65] [79]

Tabelle 3: Wellenlängen im UV-Bereich und deren Wirkung [79] nm = Nanometer.

UV-A: 315 bis 400 nm	Bewirkt geringe Polymerzerersetzung. Bewirkt Sonnenbräunung aber keinen Sonnenbrand. Wird von Fensterglas durchgelassen.
UV-B :280 bis 315 nm	Kürzester auf der Erdoberfläche auftretender Wellenlängenbereich des Sonnenlichts. Bewirkt hohe Polymerzerersetzung. Gibt Sonnenbrand. Wird von Fensterglas absorbiert
UV-C: Unter 280 nm	Nur im Weltraum anzutreffen. Wird durch Ozon in der Atmosphäre ausgefiltert. Wirkt keimtötend

Weil UV-A-Strahlen das Spektrum des Tageslichtes nicht unterschreiten, ist die Korrelation zur natürlichen Bestrahlung etwas grösser als bei UV-B-Strahlen.

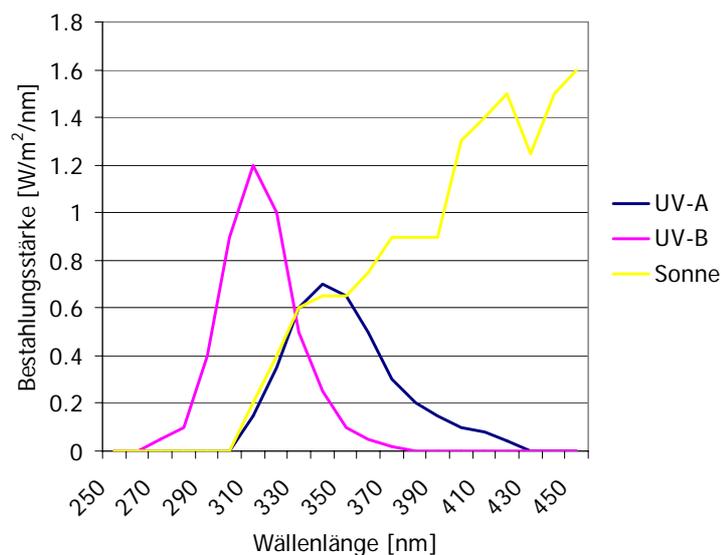


Diagramm 2: Spektrale Energieverteilung von UV-A, UV-B und Sonnenstrahlung [65]

3.1.3 Wasserdampfsorption

Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff. Er kann Feuchtigkeit, abhängig von der Luftfeuchte, in Form von Wasserdampf aufnehmen oder abgeben. Die Vorgänge der Wasseraufnahme, -abgabe und des Feuchtetransportes im Holz unterliegen kapillarphysikalischen Gesetzmässigkeiten.

3.1.3.1 Holzfeuchte

Der prozentuale Feuchtigkeitsgehalt ist das Verhältnis zwischen der Masse des Wassers im Holz und der Masse des wasserfreien (darrtrocken) Holzes.

3.1.3.2 Schwind- und Quellverhalten

Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft des Holzes kommt es bei der Adsorption zum Quellen und bei der Desorption zum Schwinden des Holzes. Diese Dimensionsänderungen treten nur zwischen dem darrtrockenen Zustand und dem Fasersättigungsbereich auf. Mit der Fasersättigung erreicht das Holz sein maximales gequollenes Volumen.

Das Quellmass α ergibt sich bei der Quellung von trockenen auf den feuchten Zustand des Holzes. Bei Massivholz werden folgende Arten der Quellung definiert:

- α_l : Quellung in Längsrichtung (longitudinal) [%]
- α_t : Quellung in tangentialer Richtung [%]
- α_r : Quellung in radialer Richtung [%]

3.1.4 Dichte

Die Dichte eines Stoffes wird durch das Verhältnis von Masse zu Volumen bestimmt.

Die Rohdichte von Holz ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen einschliesslich des Porenvolumens. Da die Rohdichte des Holzes von Feuchtigkeitsgehalt abhängt, ist der Feuchtigkeitsgehalt zum Zeitpunkt der Rohdichtebestimmung anzugeben.

Die Rohdichte nach Lagerung im Normalklima wird als Normal-Rohdichte bezeichnet.

Die Darrdichte bezieht sich auf die 0 % Holzfeuchtigkeit.

3.1.5 Härte

Die Härte ist der Widerstand, den Holz dem Eindringen eines härteren Körpers entgegensetzt.

Die Härte bei Holz ist abhängig von verschiedenen Faktoren:

- Der Holzart, insbesondere der Rohdichte
- Der Schnittichtung. Der Anisotropiekoeffizient parallel zur Faserrichtung zu quer zur Faserrichtung beträgt rund 2.5
- Der Holzfeuchte

3.1.6 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit ist der Widerstand von Holz gegen Bruch bei Biegebeanspruchung. Die Biegefestigkeit wird durch das Verhältnis von Biegemoment bei Maximalkraft zum Widerstandsmoment des Querschnittes bestimmt.

3.1.7 Rasterelektronenmikroskop

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) stellt eine wichtige Untersuchungsmethode der Mikrostruktur von Holz dar.

Im Vakuum wird ein Elektronenstrahl erzeugt und fein fokussiert rasterförmig über den vergoldeten Holzkörper geführt. Die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Objekt erzeugt eine Reihe von Signalen. Diese Signale werden mit geeigneten Detektoren aufgefangen und elektronisch zu Abbildungen und Spektren verarbeitet.

3.1.8 Statistische Auswertung

Mittelwert \bar{x}

Der arithmetische Mittelwert ist die Summe aller Einzelwerte x_i der Stichprobe geteilt durch ihre Anzahl n . [85]

Formel 1: Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianz s^2

Die Varianz einer Stichprobe ist die Summe der Quadrate der Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert dividiert durch die Zahl der Freiheitsgrade, $f = n - 1$. [85]

Formel 2: Varianz

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Standartabweichung s

Die Standartabweichung der Stichprobe ist die positive Wurzel aus der Varianz.

Sie ist ein Mass für die Streuung der Einzelwerte x_i um den Mittelwert. Die Standartabweichung hat die Masseinheit der Einzelwerte. [85]

Formel 3: Standartabweichung

$$s = \sqrt{s^2}$$

Vergleich zweier Mittelwerte

Mit Hilfe des t-Testes wird geprüft, ob zwischen einem Mittelwert \bar{x}_1 , berechnet aus n_1 Messwerten und einem Mittelwert \bar{x}_2 , berechnet aus n_2 Messwerten ein statistisch gesicherter Unterschied besteht. Für die Anwendung des t-Testes muss vorausgesetzt werden, dass alle Messwerte normalverteilt sind.[71]

Die Testgrösse t wird folgendermassen ermittelt:

Formel 4: t-Wert

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}$$

Wenn $n_1 = n_2 = n$, dann vereinfacht sich die Beziehung zu:

Formel 5: t-Wert wenn $n_1 = n_2 = n$

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \cdot \sqrt{n}$$

Gilt für den t-Wert $|t| \geq t_{1-\alpha}$ mit ($t_{1-\alpha}$ aus der Tabelle A-34 im Anhang für $f = n_1 + n_2 - 2$

Freiheitsgrade), so besteht zwischen den Mittelwerten mit einer statistischen Sicherheit $1 - \alpha$ ein signifikanter (statistisch gesicherter) Unterschied. Für die vorliegende Arbeit wurde jeweils ein Signifikanzniveau α von 95 % gewählt.

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsmaterial

Das Versuchsmaterial für alle folgenden Versuche (Vorversuche und Hauptversuche) stammte von Einschlägen im Kanton Zürich (exakterer Standort nicht möglich, da das Holz im Sägewerk gekauft und nicht speziell gefällt wurde). Die Lieferung erfolgte durch die Sägerei Kehrli aus Rifferswil. Das Sortiment wurde dort ausgewählt. Es wurden Klotzbretter aus rotkerniger Buche, sowie braunkerniger Esche verwendet.

4.1.1 Rotbuche *Fagus sylvatica* L.

Die Buche stammte aus dem Zürcher Unterland. Sie wies einen ausgeprägten Rotkern auf. Die Klotzbretter hatten eine Länge von 1600 mm und eine Dicke von 60 mm. Es stand ungefähr ein halber Kubikmeter zu Verfügung.

Aufgrund des Rotkernanteils wurde das Rundholz als C Qualität gehandelt. Ansonsten wies die Buche keine qualitätsmindernden Wuchseigenschaften auf. Die Schnittware wurde als drittklassiges Holz deklariert.

Für die thermische Behandlung und die anschliessenden Prüfungen wurden Proben aus dem rotkernigen und aus dem unverfärbten Bereich entnommen. Die Proben mit und ohne Rotkern wurden immer in unmittelbarer Nachbarschaft aus den Brettern entnommen. Nach dem Zuschnitt der Proben wurden diese im Normalklima (20° C und 65 % relative Luftfeuchte) bis zur Massekonstanz gelagert.

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von rotkerniger Buche gelten gegenüber unverfärbter Buche als unbeeinträchtigt. Die Annahme, dass Inhaltsstoffe von rotkernigem Buchenholz trotzdem einen Einfluss auf die technologischen Eigenschaften haben könnten, veranlasste Molnár et al. [67] zu physikalischen und mechanischen Untersuchungen an rotkernigem Holz. Die Ergebnisse zeigen eine leicht erhöhte Dichte, was auch einen Grund für die höhere Härte von rotkernigem Buchenholz sein kann.

In Tabelle 4 sind die physikalischen Werte von *Fagus sylvatica L.* aus der Literatur zusammengefasst.

Tabelle 4: Physikalische Kennwerte von rotkerniger Buche und Buche ohne Rotkern nach Molnár et al [67]. Werte zum Vergleich nach Wagenführ [92] \parallel = parallel zur Faser, \perp = quer zur Faser

Materialeigenschaft		Buche ohne Rotkern nach Molnár [67]	Buche mit Rotkern nach Molnár [67]	Buche nach Wagenführ [92]
Dichte ($u = 12-15\%$)	[g/cm ³]	0.712	0.723	0.72
maximales Quellmass α				
tangential	[%]	12.27	11.08	11.8
radial	[%]	6.04	5.85	5.8
longitudinal	[%]	0.47	0.51	0.3
Volumen	[%]	18.05	16.78	17.9
Brinell-Härte				
Longitudinal	H _{BII} [N/mm ²]	57.59	57.55	72
tangential	H _{B-L} [N/mm ²]	25.07	27.72	34
radial	H _{B-L} [N/mm ²]	22.13	24.58	
Biegefestigkeit	σ_{bBII} [N/mm ²]	-	-	123
Biege-E-Modul	E _{II} [N/mm ²]	13972.8	13345.5	16000

In Tabelle 5 sind Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte des rotkernigen Probenkollektives von Buche sowie die Daten des Probenkollektives von Buche ohne Rotkern vor der thermischen Behandlung aufgeführt.

Tabelle 5: Holzfeuchtigkeit, Rohdichte und Darrdichte nach Lagerung im Normalklima von Buche vor der thermischen Behandlung. Links Buche ohne Rotkern, rechts Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung

Buche ohne RK Anzahl Prüfkörper: 40	Vor der Behandlung		Buche mit RK Anzahl Prüfkörper: 40	Vor der Behandlung	
	\bar{x}	s		\bar{x}	s
Holzfeuchte [%]	12.18	0.26	Holzfeuchte [%]	12.84	0.31
Rohdichte [g/cm ³]	0.64	0.02	Rohdichte [g/cm ³]	0.73	0.01
Darrdichte [g/cm ³]	0.61	0.02	Darrdichte [g/cm ³]	0.70	0.01

Für die Ermittlung der Daten wurden die Formel 8: Holzfeuchtegehalt, die Formel 10: Normalrohndichte und die Formel 11: Darrdichte, wie sie in Kapitel 4.4 beschrieben sind verwendet. Die Einzelwerte der Prüfkörper für Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte sind in Tabelle A-1 und Tabelle A-2 des Anhanges aufgeführt.

Ein t-Test zeigte, dass die Unterschiede der Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte von Buche mit Rotkern im Vergleich zu Buche ohne Rotkern signifikant sind.

4.1.2 *Esche Fraxinus excelsior L.*

Die Esche stammte aus dem Knonaueramt (Kt. ZH) aus einer Höhenlage zwischen 500 und 600 Meter über Meer. Der Braunkernanteil betrug ca. 30 bis 40 % der gesamten Eschenlieferung. Somit dürfte das Rundholz in die Qualitätsstufe C oder B eingeteilt worden sein. Die Rundholzqualitätseinstufung konnte der Säger nicht mehr angeben, die Esche lag schon längere Zeit eingeschnitten im Lager. Als Schnittware wurde das Sortiment mit der Qualität II bis III gehandelt. Die Esche hatte sonst keine qualitätsmindernde Wuchseigenschaften. Das Holz war sehr regelmässig in der Textur und wies eine regelmässige Jahrringbreite auf. Auch aus diesem Sortiment wurden die Proben für die physikalischen, mechanischen und farblichen Prüfungen getrennt aus braunkernigem und nicht braunem Eschenholz gefertigt. Die braunkernigen Proben sowie die Proben ohne Braunkern wurden dabei immer in unmittelbarer Nähe aus den Brettern entnommen. Nach dem Probenzuschnitt sind die Prüfkörper bis zur Datenaufnahme und zur Behandlung im Normklima gelagert worden.

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von braunkernigem und nicht braunkernigem Eschenholz gelten als gleichwertig. Allfällige Unterschiede hängen nach Kollmann [58] in erster Linie von Umständen ab, wie beispielsweise der Dichte, dem Spätholzanteil sowie von anatomischen und auch chemischen Eigenheiten der Zellwand. Angaben über das Schwindmass und über die Härte von braunkerniger Esche liegen den Recherchen nicht vor. In Tabelle 6 sind die physikalischen Werte von Esche aus der Literatur zusammengefasst.

Tabelle 6: Physikalische Kennwerte von braunkerniger Esche und Esche ohne Braunkern nach Kollmann [58]. Werte zum Vergleich nach Wagenführ [92] \parallel = parallel zur Faser, \perp = quer zur Faser

Materialeigenschaft			Esche ohne Braunkern nach Kollmann [58]	Esche mit Braunkern nach Kollmann [58]	Esche nach Wagenführ [92]
Darrdichte ($u = 0\%$)		[g/cm ³]	0.686	0.717	0.65
maximales Quellmass α					
tangential		[%]	-	-	8.0
radial		[%]	-	-	5.0
longitudinal		[%]	-	-	0.2
Volumen		[%]	-	-	13.2
Brinell-Härte					
longitudinal	$H_{B\parallel}$	[N/mm ²]	-	-	65
tangential	$H_{B\perp}$	[N/mm ²]	-	-	39
radial	$H_{B\perp}$	[N/mm ²]	-	-	
Biegefestigkeit	$\sigma_{B\parallel}$	[N/mm ²]	116	125	117
Biege-E-Modul	E_{\parallel}	[N/mm ²]	13945	14719	13400

In Tabelle 7 sind Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte vom braunkernigen Probenkollektiv der Esche sowie die Daten der Esche ohne Braunkern aufgeführt.

Tabelle 7: Holzfeuchtigkeit, Rohdichte und Darrdichte nach Lagerung im Normalklima von Esche vor der thermischen Behandlung. Links Esche ohne Braunkern, rechts Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung

Esche ohne BK Anzahl Prüfkörper: 20	Vor der Behandlung		Esche mit BK Anzahl Prüfkörper: 20	Vor der Behandlung	
	\bar{x}	s		\bar{x}	s
Holzfeuchte [%]	11.79	0.48	Holzfeuchte [%]	12.18	0.42
Rohdichte [g/cm ³]	0.62	0.01	Rohdichte [g/cm ³]	0.66	0.01
Darrdichte [g/cm ³]	0.60	0.01	Darrdichte [g/cm ³]	0.61	0.01

Die Einzelwerte der Prüfkörper für Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte sind in Tabelle A-3 und Tabelle A-4 des Anhanges aufgeführt.

Die Unterschiede der Holzfeuchte, Rohdichte und Darrdichte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern erweisen sich als signifikant.

4.2 Vorversuche

Es wurden vier verschiedene Verfahren der thermischen und hydrothermischen Behandlung bei den Vorversuchen im Labormassstab geprüft. Darauf aufbauend wurde der Versuchsumfang für die Hauptversuche definiert.

4.2.1 Ziel der Vorversuche

Die Durchführung von Vorversuchen hatte folgende Ziele:

- Abschätzung des Farbegalisierungseffekt
- Untersuchung des Einflusses der Behandlungsparameter (Zeit, Temperatur und Medium im Behandlungsraum) auf die Farbänderung und qualitätsmindernde Faktoren wie zum Beispiel Risse, Verformungen.

4.2.2 Einteilung der Vorversuche nach Behandlungsmethoden

In Abbildung 9 sind die verschiedenen Behandlungsverfahren der Vorversuche in hydrothermische und thermische Behandlung eingeteilt. Bei der hydrothermischen Behandlung ist nach dem Vergütungsprozess in der Regel eine technische Trocknung nötig. Das Holz nimmt während der hydrothermischen Behandlung Wasser auf.

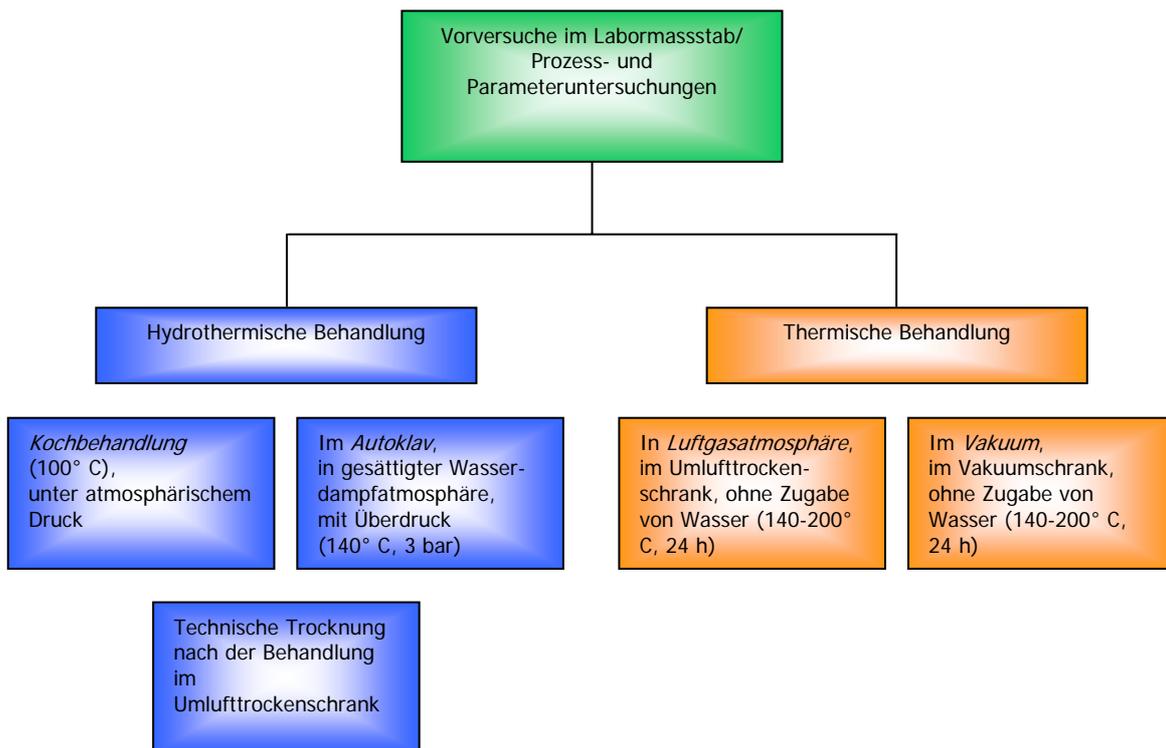


Abbildung 9: Einteilung der Vorversuche in hydrothermische und thermische Behandlung

Die in den Vorversuchen untersuchten Verfahren sind im Anhang im Kapitel A 3 aufgeführt.

4.2.3 *Behandlungsparameter*

Bei der thermischen und hydrothermischen Behandlung haben folgende Behandlungsparameter einen grossen Einfluss auf die Modifikation des Holzes:

- Behandlungstemperatur
- Behandlungsdauer
- Holzfeuchte der Prüfkörper
- Medium im Behandlungsraum (z.B. Stickstoff, Wasserdampf)

Laut Kollmann, Keylwerth und Kübler [60] ist die Verfärbung von Holz bei der thermischen Behandlung bis 70° C gering, mässig zwischen 70 und 140° C und stark oberhalb 140° C.

Die Dunkelfärbung von Holz ist unter Temperatureinwirkung in den ersten 5 bis 10 h am Stärksten.

Zwischen 0 und 15 % Holzfeuchtigkeit kann der Einfluss der Holzfeuchtigkeit auf die Verfärbung von Holz unter Temperatureinwirkung vernachlässigt werden. Zwischen 15 und 40 % ist eine merkliche Dunkelfärbung zu verzeichnen [59]. In der Industrie erfolgt die thermische Behandlung oft im Anschluss an die technische Trocknung somit weist das Holz vor einer thermischen Behandlung einen Holzfeuchtegehalt von 8 bis 12 % auf.

Bei der rein thermischen Vergütung sind niedrige Holzfeuchten erforderlich, um Rissbildungen zu vermeiden.

Die relative Luftfeuchte in der Prozesskammer ist vor allem bei der thermischen Behandlung in Luftgasatmosphäre von Bedeutung. Zum Beispiel kommt beim Stellacverfahren aus Finnland [48] Wasserdampf in verschiedenen Phasen der Behandlung zum Einsatz. Einerseits hat der Wasserdampf einen Einfluss auf den Behandlungsprozess und andererseits wirkt er sich direkt auf das Holz aus. So wird der Prozess feuersicher gemacht. Durch den Einsatz von Wasserdampf wird die Sauerstoffkonzentration im Prozessraum reduziert. Die Entflammbarkeit des Holzes und der thermische Abbau werden dadurch herabgesetzt. Der Wärmeübertrag nimmt durch die steigende Konzentration an Wasserdampf zu. Erfolgt eine Befeuchtung in der Schlussphase der Behandlung weist das Holz nach der Behandlung einen etwas höheren Wassergehalt auf. Dieser übersteigt jedoch 6 bis 8 % Wassergehalt kaum [48]. Kommt dagegen kein Wasserdampf in der Schlussphase zum Einsatz weist das thermisch vergütete Holz etwa 0 % Holzfeuchtigkeit auf. Das Holz muss dann konditioniert werden.

4.2.4 Ergebnisse der Vorversuche

Die *Kochbehandlung* erzielte die geringste Farbänderung. Die erreichte Dunkelfärbung lag im untersuchten Bereich deutlich unter den Anforderungen.

Die hydrothermische Behandlung im *Autoklav* stellt hohe Anforderungen an die erforderliche Gerätetechnik. Es ist ein Hochdruckautoklav mit 50 Bar Überdruck erforderlich. Ein solches Gerät stand nicht zur Verfügung. Der benutzte Autoklav erreichte maximal 150° C was einem Dampfdruck von 5.2 bar entsprach. Eine industrielle Nutzung wäre im Vergleich zu den anderen Verfahren mit relativ hohen Investitions- und Betriebskosten verbunden. Die Verfärbung erwies sich als geeignet.

Die Behandlung im *Vakuum* war im Vergleich zur Behandlung in Luftgasatmosphäre weniger intensiv. Um gleichwertige Farbänderungen wie bei der Behandlung in Luftgasatmosphäre zu erreichen, bedarf es um 20 bis 40° C höhere Prozesstemperaturen.

Die Behandlung in *Luftgasatmosphäre* erwies sich aufgrund der deutlichen Farbänderung als die beste. Innerhalb von relativ kurzer Zeit veränderte sich die Farbe des Holzes ausreichend. Die Behandlung in Luftgasatmosphäre erfordert eine einfache aber genügend wärmegeämmte Kammer mit einer Konvektionsheizung bis Temperaturen um 220° C. Eine solche Einrichtung lässt sich auch industriell relativ einfach realisieren.

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in ausführlicher Form im Kapitel A 3.4 des Anhangs beschrieben.

Aufgrund der Ergebnisse wurde für die Hauptversuche die Behandlung in Luftgasatmosphäre gewählt. Die Prozessparameter richteten sich ebenfalls nach den Feststellungen der Vorversuche und sind im nachfolgenden Kapitel aufgeführt.

4.3 Hauptversuche

4.3.1 Versuchsübersicht

Die in Tabelle 8 und Tabelle 9 dargestellten Serien sind für alle Prüfmethode durchgeführt worden.

Tabelle 8 Behandlungsserien von Esche

Behandlungszeit \ Behandlungs- temperatur	6 Stunden	12 Stunden	24 Stunden
160° C			X
180° C			X
200° C	X	X	X

Die Esche wurde bei 200° C nach 6, 12 und 24 h Behandlungszeit und bei 200, 180 und 160° C nach 24 h Behandlungszeit geprüft. Somit liess sich aus den drei Stufen pro Behandlungsparameter ein Trend der untersuchten Eigenschaften darstellen.

Tabelle 9: Behandlungsserien von Buche

Behandlungszeit \ Behandlungs- temperatur	6 Stunden	12 Stunden	24 Stunden
160° C	X		X
180° C	X	X	X
200° C	X		

Bei Buche wurde die Untersuchung des Einflusses der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur durchgeführt, da sich 200° C mit Behandlungszeiten über 6 h bei den Vorversuchen als zu hoch erwiesen. Für die Ermittlung des Einflusses der Temperatur wurde eine Behandlungsdauer von 6 h gewählt. Dadurch konnten auch die 200° C mit einbezogen werden. Bei Buche wurde zusätzlich eine Farbmessung nach 3 h Behandlungsdauer durchgeführt.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Der Prozess erfolgte in einem Umlufttrockenschrank der Firma Salvis unter Normaldruck in Luftgasatmosphäre. Es wurden keine weiteren Stoffe zugeführt. Alle sich bildenden Gase und entstehender Wasserdampf entweichen in den Prozessraum. Das Gasgemisch im Schrank wurde ständig abgeführt, und frische Umgebungsluft wurde zugeführt. Die Behandlung erfolgte ohne Zugabe von Wasserdampf. Die relative Luftfeuchtigkeit im Prozessraum sank während der Behandlung auf etwa 0 %.

Ein Gebläse sorgte für die gleichmässige Verteilung der warmen Luft im Schrank, somit war eine einheitliche Modifikation aller Prüfkörper gewährleistet. Die Wärmeübertragung im Prozessraum erfolgte durch die Wärmeleitung des Luftgasgemisches.

Marke: Salvis
Gerätetyp: UT 20
Nutzraumvolumen: 488 x 537 x 411 mm³
Temperaturbereich: 20 – 250° C



Abbildung 10: Umlufttrockenschrank der Firma Salvis. Links PC mit Datenlogger

Vor der Behandlung wurden die Proben im Normalklima klimatisiert und die Normal-Rohdichte ermittelt. Anschliessend wurden die Proben, die für die Ermittlung des Masseverlustes bestimmt waren, bei 103° C bis zur Massekonstanz gedarrt. Somit konnten die Holzfeuchte vor der Behandlung und die Darrmasse zur Ermittlung des Masseverlustes durch die Wärmebehandlung bestimmt werden.



Abbildung 11: Umlufttrockenschrank der Firma Salvis beschickt mit Buchenprüfkörper zur Farb- und Härtemessung oben, zur Biegefestigkeitsmessung mitte und Sorptions- und Quellungsmessung unten

Der Umlufttrockenschrank wurde auf die gewünschte Behandlungstemperatur aufgeheizt. Die Aufheizphase betrug je nach Behandlungstemperatur etwa 1 h bei 160° C bis 2 h bei 200° C. Die effektive Behandlung begann bei Erreichen der Behandlungstemperatur. Für die Serie 24 h/200° C von Esche wurde exemplarisch der Temperaturverlauf mit einem digitalen Datenlogger aufgezeichnet und ist in Diagramm 3 dargestellt.

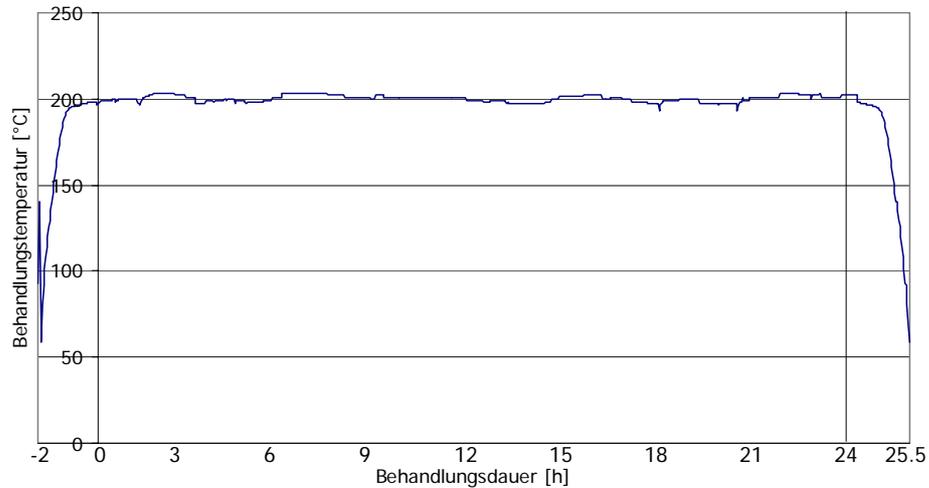


Diagramm 3: Temperaturverlauf der thermischen Behandlung bei 24 h Behandlungszeit und 200° C Behandlungstemperatur

Die Temperatur war über den gesamten Behandlungsvorgang konstant mit einer maximalen Abweichung der Solltemperatur von $\pm 3.4^\circ \text{C}$. Die Temperaturverteilung innerhalb des Trockenschrankes konnte durch drei verschieden platzierte Temperatursonden als gleichmässig nachgewiesen werden. Die relative Luftfeuchtigkeit im Prozessraum konnte nicht ermittelt werden. Man kann davon ausgehen, dass sich die relative Luftfeuchtigkeit gegen null bewegte, da der Trockenschrank Umgebungsluft ansaugte und im Wärmetauscher aufheizte. Die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft betrug ca. 30 %. Nach Ablauf der Behandlungszeit wurden die Proben im Trockenschrank auf ca. 50° C abgekühlt. Danach sind die Proben im Normalklima bis zum vollständigen Temperatúrausgleich und bis zur Massekonstanz gelagert worden.

4.4 Prüfmethoden

4.4.1 Farbmessung

Ziel der Farbmessung war es, Informationen über das Farbverhalten und der daraus resultierenden Farbegalierung von farbkernigem Holz im Vergleich zu nicht farbkernigem Holz von Buche und Esche in Abhängigkeit der thermischen Behandlung zu erhalten.

Mit einem Spektralphotometer der Firma Minolta (Chroma-Meter CR-200) wurden die Farbkennwerte L^* , a^* und b^* nach DIN 5033 [25] gemessen.

An Prüfkörpern mit den Abmessungen 50 x 50 x 50 mm wurden auf einer Tangentialschnittfläche vier Farbmessungen durchgeführt. Die Mittelwerte von a^* , b^* und L^* aus den vier Messungen definierten die Farbe eines Prüfkörpers. Mit Hilfe einer Schablone konnten die Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten genau am gleichen Ort auf der Probenoberfläche vorgenommen werden. Pro Serie wurden 20 Prüfkörper vermessen, 10 mit Farbkern und 10 ohne Farbkern. Somit ergaben sich je 40 Farbmessungen pro Behandlungsart für farbkernige Proben und für nicht farbkernige Proben.



Abbildung 12: Farbmessgerät Chroma-Meter CR-200 von Minolta (rechts), Schablone und Prüfkörper sowie Messkopf (mitte), Laptop zur Datenverwaltung (links)

Vor jeder Messreihe wurde das Farbmessgerät gegen den Weissstandard kalibriert. Gemessen wurde mit einem Sensor von 8 mm Durchmesser und der Tageslicteinstellung D65.

Die ermittelten Farbwerte dienen zur Charakterisierung des Farbtones eines Prüfkörpers. Die Streuung gab Aufschluss über die Farbhomogenität eines Prüfkörpers, bzw. einer Prüfserie.

Der Abstand zweier Farben im Farbraum wird als Farbabstand ΔE bezeichnet. Er errechnet sich aus den Koordinaten zweier Farborte nach folgender Formel:

Formel 6: Farbdifferenz

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

$$\Delta a = a_T - a_R$$

$$\Delta b = b_T - b_R$$

Formel 7: Helligkeitsdifferenz

$$\Delta L = L_T - L_R$$

L: Helligkeitswert

a, b: Farbkenwert

T: Testwert

R: Referenzwert

Die Helligkeitsdifferenz ΔL und die Farbdifferenz ΔE wurden als Größen herangezogen um den Farbegalisierungseffekt einer thermischen Behandlung zwischen Farbkern und Splint einer Behandlungsserie zu beschreiben.

4.4.2 Künstliche Bestrahlung

Die künstliche Bestrahlung dient der Alterung von Materialien unter zeitraffenden Bedingungen. Ziel der künstlichen Bestrahlung war es, Informationen über die Farbstabilität von thermisch behandelter Buche und Esche bei Verwendung in Innenräumen zu erhalten.

Dabei wurden auch zwei verschiedene Versiegelungssysteme, wie sie in der Parkettindustrie eingesetzt werden, auf thermisch behandelte Proben mit untersucht.

Die künstliche Bestrahlung kann nie exakt die realen Bedingungen nachbilden, sie gibt aber gute Anhaltspunkte für das Materialverhalten. Einflüsse wie schwankende Luftfeuchtigkeiten, Temperaturschwankungen, mechanische sowie chemische Beanspruchung der Oberflächen können bei der künstlichen Bestrahlung nicht berücksichtigt werden. Die Resultate dieser Bestrahlungsprüfung dienen vor allem einem Vergleich zwischen thermisch behandeltem und unbehandeltem Holz.

Es wurden Buchen- und Eschenproben mit den Dimensionen 500 x 100 x 11.2 mm angefertigt. Diese Proben entsprechen der Decklage von Mehrschichtparkett. Die Prüfkörper, bestehend aus 50 % Farbkern und 50 % unverkerntem Holz, wurden von der Firma Bauwerk AG mit zwei verschiedenen Versiegelungslacken behandelt. Es handelte sich um einen Acrylatlack und einem Wasserlack. Der Acrylatlack wurde mittels einer mehrstufigen Applikation im Werk über ein Walzverfahren aufgetragen. Die vollständige Aushärtung erfolgte mit ultraviolettem Licht. Die Wasserlackversiegelung, bestehend aus einem Grundlack auf Akrylat-Polyurethandbasis und einem zweikomponenten Decklack auf Polyurethan-Dispersionsbasis wird in der Praxis nach dem Verlegen des Parketts mittels einer Wasserlackrolle aufgetragen. Im vorliegenden Fall erfolgte die Applikation im Werk mit einer Wasserlackrolle. Die technischen Merkblätter der Versiegelungssysteme sind im Kapitel A 7 des Anhanges abgebildet.

Die Bestrahlungsprüfung wurde an thermisch behandelten Proben, die mit 180° C während 6, 12 und 24 h vergütet worden sind, durchgeführt. Die Proben wurden an der HSB Biel in einer UV-Bewitterungsanlage des Types QUV Accelerated Weathering tester (Abbildung 13) der Firma Q-Panel für 432 h bestrahlt. Die Durchführung erfolgte in Anlehnung an DIN 11507 [19]. Sie beschreibt die künstliche Bewitterung durch UV-Strahlung und Wasser. Die Prüfung erfolgte jedoch ohne Wasser. Es wurde nur die Lichteinwirkung auf Parkett simuliert. Als Strahlungsquelle dienten 8 UV-A Lampen, die ein Spektrum zwischen 300 und 400 Nanometer aufweisen und ein Emissionsmaximum bei 351 Nanometer haben. Diese Art von Lampe ist besonders geeignet zum Nachbilden des UV-Anteils von Tageslicht hinter Fensterglas.



Abbildung 13: UV-Bewitterungsanlage QUV Accelerated Weathering tester der Firma Q-Panel mit offenem Deckel und eingesetzten Prüfkörpern

In Tabelle 10 sind die Parameter der künstlichen Bestrahlung zusammengefasst.

Tabelle 10: Parameter der künstlichen Bestrahlung

Strahlungsquelle		UV-A (351 nm)
Bestrahlungsstärke	E	[W/m ² /nm] 0.75
Komplettstrahlung		[W/m ²] 36.04
Bestrahlung	H	[MJ/m ²] 55.8
Dauer der Bestrahlung		[h] 432
Temperatur im Probenraum		[°C] 37 (± 2)
Luftfeuchtigkeit im Probenraum		[%] 30 (± 5)

Die Bestrahlungsstärke E ist der Strahlungsfluss bei einer bestimmten Wellenlänge angegeben in Watt je Quadratmeter. Die Bestrahlung H ist ein Mass für die Strahlungsenergie, durch die eine Probe beansprucht wird, gegeben durch die Komplettstrahlung und die Dauer der Beanspruchung. H wird dementsprechend in Joule je Quadratmeter ausgedrückt. Wenn die Bestrahlungsstärke E während der gesamten Dauer der Beanspruchung konstant ist, ist die Bestrahlung H das Produkt aus Komplettstrahlung und Bestrahlungsdauer. Die Komplettstrahlung ist der Strahlungsfluss des gesamten Spektrums der Lampen.

Die Temperatur wurde am Gerät mittels eines Thermometers überwacht, das auf eine schwarze Platte montiert war. Das Schwarztafelthermometer sollte den gleichen Bedingungen ausgesetzt sein wie die Probenkörper. UV-Leuchtstofflampen emittieren relativ wenig infrarote Strahlung. Daher erwärmt sich die Oberfläche der Proben hauptsächlich durch Konvektion der erhitzten Luft. Somit unterscheiden sich die Temperaturen an der dunkeln Oberfläche eines Probenkörpers und der Luft in der Prüfkammer nur sehr gering.

Vor der Bestrahlungsprüfung sind die UV-Leuchtstofflampen mittels eines Radiometers kalibriert worden. Dabei sind die Lampen auf ihre Bestrahlungsstärke justiert worden.

Aus Erfahrungswerten ergibt sich für Mitteleuropa durch diese Bestrahlung eine Zeitraffung um den Faktor 10. Die im Versuch durchgeführte Bestrahlung entspricht daher etwa einem halben Jahr nach Süden ausgerichteter Exposition hinter Fensterglas in unseren Breitengraden.

In bestimmten Zeitabständen, wie sie in Tabelle 11 aufgeführt sind, wurden die FarbKennwerte während der Bestrahlung mittels Schablone und dem Spektralphotometer Chroma-Meter 200 gemessen. Es wurden jeweils vier Farbmessungen pro Prüfkörper durchgeführt, zwei Messungen im farbkernigen Bereich und zwei im nicht farbkernigen Bereich. Es wurde der Mittelwert aus den 4 Messungen gebildet.

Tabelle 11: Zeitpunkt der Farbmessung während der UV-Bestrahlung

Messung 1	nach 48 h Bestrahlung
Messung 2	Nach 96 h Bestrahlung
Messung 3	Nach 168 h Bestrahlung
Messung 4	Nach 240 h Bestrahlung
Messung 5	Nach 336 h Bestrahlung
Messung 6	Nach 432 h Bestrahlung

4.4.3 Sorptions- und Quellungsprüfung

Die Ziele der Sorptions- und Quellungsversuche waren das hygroskopische Verhalten von thermisch behandelter Buche und Esche im Vergleich zu unbehandeltem Holz aufzuzeigen.

Prüfkörper mit den Abmessungen 50 (radial) x 50 (tangential) x 10 mm (längs) wurden bei einer konstanten Temperatur von 20° C nacheinander fünf verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Dazu wurden in einem Klimaschrank der Firma Espec jeweils 20 Proben jeder Behandlungsserie bis zur Massekonstanz im Klima gelagert. Die Massekonstanz galt als erreicht, wenn die Ergebnisse zweier im Abstand von 24 Stunden aufeinander folgender Messungen um nicht mehr als 0.1 % der Prüfkörpermasse voneinander abwichen.

Nach jeder Klimastufe wurden die Dimensionen in radialer, tangentialer und Längsrichtung gemessen, sowie die Masse gewogen. Zum Schluss wurden die Proben bei 103° C gedarrt. Anschliessend wurde über die Formel 8 der jeweilige Feuchtegehalt und über Formel 9 das Quellmass, bezogen auf die Darrmasse, der Proben bestimmt.



Abbildung 14: Links: Klimaschrank der Firma Espec besetzt mit Prüfkörper zur Messung der Sorptions- und Quellungseigenschaften. Rechts: PC mit Datenlogger zur Überwachung der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit

Formel 8: Holzfeuchtegehalt nach DIN 52183 [27]

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100 \text{ [%]}$$

m_u : Masse des feuchten Holzes [g]

m_o : Masse des wasserfreien (darrtrockenen) Holzes [g]

Formel 9: Quellmass

$$\alpha = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

l_0 : Dimension bei $u = 0 \text{ %}$ [mm]

l_u : Dimension bei feuchtem Holz [mm]

Tabelle 12 zeigt die ausgewählten Klimas für die Feuchteverformungs- sowie für die Sorptionsmessungen.

Tabelle 12: Die verschiedenen Klimastufen zur Bestimmung der Feuchteverformung und Sorptionseigenschaften

	rel. Luftfeuchtigkeit [%]	Temperatur [°C]
Klima 1	35	20
Klima 2	50	20
Klima 3	65	20
Klima 4	80	20
Klima 5	93	20
Darrtrocknung	0	103

4.4.4 Prüfung der Masseänderung

Ziel der Aufzeichnung der Masseänderung durch die thermische Behandlung war es den Grad des thermischen Abbaus durch eine Hitzebehandlung darzustellen (bezogen auf die Masse im darrtrockenen Zustand vor der Behandlung).

Dazu wurden Prüfkörpern mit den Abmessungen 50 x 50 x 10 mm vor und nach der thermischen Behandlung im Darrzustand gewogen und die Dimensionen in den drei anatomischen Wuchsrichtungen aufgenommen.

Direkt abhängig von der Masseänderung ist die Dichte des Holzes. Über die Formel 10 und Formel 11 wurden vor und nach der thermischen Behandlung die Normalrohddichte ρ_N bzw. die Darrdichte ρ_0 ausgerechnet.

Formel 10: Normalrohddichte nach DIN 52182 [26]

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

m_N : Masse im Normalklima [g]

V_N : Volumen im Normalklima [cm³]

Die Darrdichte bezieht sich auf den darrtrockenen Zustand des Holzes ($u = 0 \%$).

Formel 11: Darrdichte nach DIN 52182 [26]

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

m_0 : Masse im darrtrockenen Zustand [g]

V_0 : Volumen im darrtrockenen Zustand [cm³]

4.4.5 Härteprüfung

Ziel der Härteprüfung war es aufzuzeigen wie sich die Härte in den drei anatomischen Wuchsrichtungen durch die thermische Behandlung verändert.

Die Härte wurde nach der Brinell-Methode, die in DIN 1534 [20] beschrieben ist, ermittelt. Um die Brinellhärte H_B zu bestimmen, wurde eine Stahlkugel von 10 mm Durchmesser mit einer definierten Kraft von 500 N in den zu untersuchenden Prüfkörper gedrückt. Aus dem Durchmesser der Eindrucksfläche lässt sich die Härte berechnen.

Formel 12: Brinellhärte

$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

F: Prüfkraft [N]

D: Kugeldurchmesser [mm]

d: Durchmesser der Kugelkalotte im Werkstoff [mm]

Da aber die Kugel keinen sauberen Eindruck auf der Holzoberfläche hinterlässt können bei der Messung des Kalottendurchmessers Fehler auftreten. Oft entsteht eine Wulstbildung durch herausgedrücktes Material, Einbrüche am Rand oder einen unregelmässigen Querschnitt des Eindruckes im Vollholz. Um diese Ungenauigkeiten zu umgehen wurde in der vorliegenden Arbeit mit dem von Stübi und Niemz [86] beschriebenen Verfahren der Härtemessung über die Erfassung des Eindringweges der Kugel in das Holz gearbeitet. Durch die Berechnung der Brinellhärte über die Eindringtiefe fallen diese Unsicherheiten weg, was zu einer erhöhten Genauigkeit des Messresultates führt.

Die Berechnung der Brinellhärte anhand der Eindringtiefe erfolgt durch Umformung der Formel 12.

Für die Eindringtiefe h gilt:

Formel 13: Eindringtiefe

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \text{ [mm]}$$

Daraus ergibt sich für die Berechnung der Brinellhärte folgende neue Formel:

Formel 14: Brinellhärte berechnet über die Eindringtiefe

$$H_B = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

F: Prüfkraft [N]

D: Kugeldurchmesser [mm]

h: Eindringtiefe [mm]

Die vollständige Herleitung der Brinellhärteformel unter Verwendung der Eindringtiefe ist in Kapitel A 8 des Anhanges aufgeführt.

Mit einer Zwick Universalprüfmaschine wurde die Brinellhärte gemessen. Dabei wurde die Probe innerhalb von 15 Sekunden bis zur Maximalkraft belastet, danach die Kraft 30 Sekunden konstant gehalten und in 15 Sekunden entlastet. Die Prüfung erfüllte so die Bestimmungen der DIN EN 1534 [20], ausser das nach der Entlastung zusätzlich eine Wartezeit von mindestens 3 min bis zur Messung hier nicht berücksichtigt werden konnte. Die Messung der Eindringtiefe erfolgte nach der Entlastung unmittelbar nach der Prüfung. Durch die Messung nach der Entlastung erhielt man ein Mass für die bleibende Verformung des Holzes. Auf Grund des viskoelastischen Verhaltens des Holzes bestehen erhebliche Unterschiede in der gemessenen Eindringtiefe der Kugel bei Maximallast und bei Entlastung, wie das in Diagramm 4 dargestellt ist.

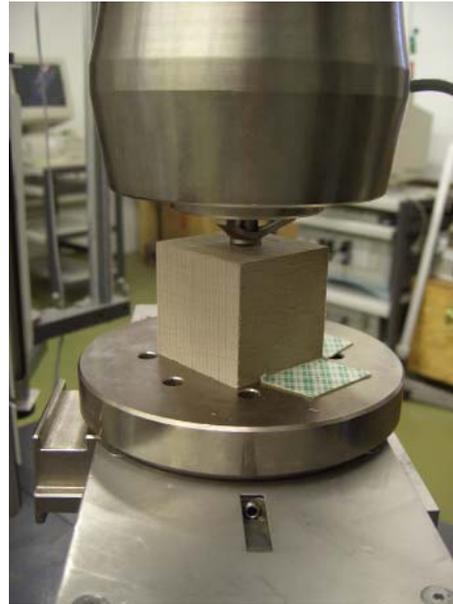


Abbildung 15: Härteprüfung an der Universalprüfmaschine

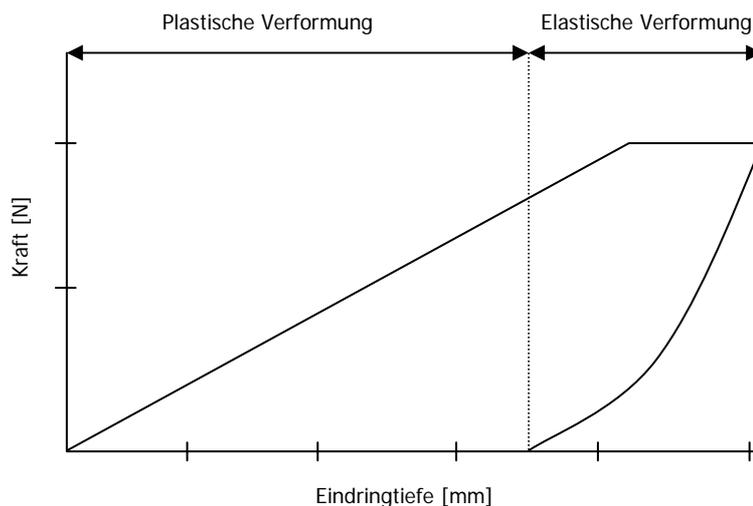


Diagramm 4: Kraft-Eindringtiefe-Diagramm mit plastischer und elastischer Verformung

Die zu prüfenden Proben wurden vor der Prüfung im Normalklima bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Die Härtemessungen wurden an Prüfkörpern mit den Ausmassen 50 x 50 x 50 mm durchgeführt. Jeweils zehn farbkernige und zehn Prüfkörper ohne Farbkern wurden auf jeder Schnittfläche einmal geprüft. Daraus ergaben sich pro Faserrichtung (radial, tangential und longitudinal) 20 Messungen für farbkernige Proben und 20 Messungen für Proben ohne Farbkern je Behandlungsserie.

4.4.6 Biegebruchprüfung

Ziel der Biegebruchprüfung war es aufzuzeigen wie sich die Biegefestigkeit und der Biegeelastizitätsmodul senkrecht zu Faser durch die thermische Behandlung veränderten.

Die Biegefestigkeit ist nach DIN 52186 [29] bestimmt. Die Biegefestigkeit σ_{bB} wurde an einer Zwick Universalprüfmaschine über die Dreipunktebelastung ermittelt. Die Stützweite l betrug 300 mm.

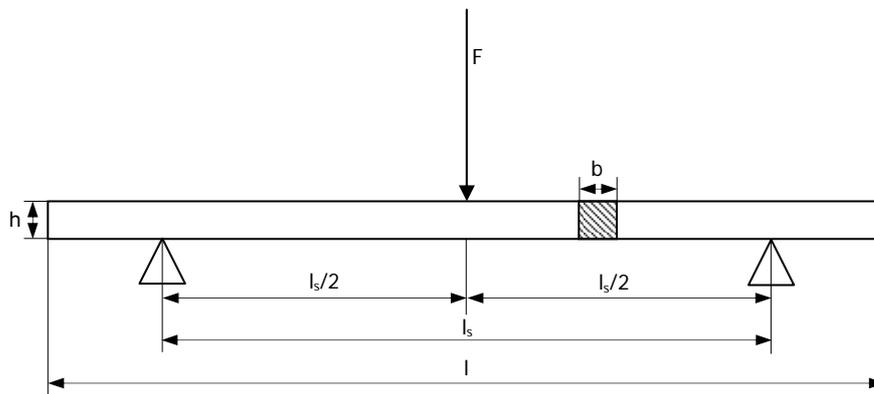


Abbildung 16: Dreipunktbelastung zur Prüfung der Biegefestigkeit nach DIN 52186 [29]

Die Berechnung der Biegespannung σ_b :

Formel 15: Biegespannung

$$\sigma_b = \frac{1.5 \cdot F \cdot l_s}{b \cdot h^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

F: Biegekraft [N]

h: Querschnittshöhe [mm]

b: Querschnittsbreite [mm]

l_s : Stützweite [mm]

Berechnung des Elastizitätsmoduls E:

Formel 16: E-Modul

$$E = \frac{l_s^3 \cdot (XH - XL)}{4 \cdot DL \cdot h^2 \cdot b} \quad [\text{N/mm}^2]$$

XH: Ende der E-Modulermittlung [N]

XL: Beginn der E-Modulermittlung [N]

DL: Durchbiegung zwischen XH und XL [mm]



Abbildung 17: Biegeprüfung an der Universalprüfmaschine

Die zu prüfenden Proben wurden vor der Prüfung im Normalklima bis zur Gewichtskonstanz gelagert. Die Messungen wurden an Prüfkörpern mit den Ausmassen 20 x 20 x 400 mm durchgeführt. Jeweils zehn farbkernige und zehn Prüfkörper ohne Farbkern wurden senkrecht zur Faser geprüft.

Tabelle 13: Maschineneinstellungen der Biegeprüfung . XL = Beginn der E-Modulermittlung, XH = Ende der E-Modulermittlung

Prüfgeschwindigkeit	[mm/min]	7.5
XL	[N/mm ²]	5
XH	[N/mm ²]	15

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Optische Eigenschaften

5.1.1 Farbegasierung

5.1.1.1 Holzfarbe des unbehandelten Buchenholzes

In Diagramm 5 sind die Farbwerte von unbehandelter Buche aufgeführt. Die Buche mit Rotkern hat im Mittel einen höheren b^* -Wert als die Buche ohne Rotkern. Sie tendiert mehr in Gelbrichtung des a^*b^* -Farbraumes. Auch weist die Buche mit Rotkern die höheren a^* -Werte auf. Somit liegt sie im Vergleich mit Buche ohne Rotkern näher bei Rot. Ebenfalls unterscheiden sich die Helligkeitswerte deutlich zwischen den beiden Probenkollektiven. Buche ohne Rotkern weist deutlich höhere L^* -Werte auf als Buche mit Rotkern. Gemäss t-Test ist der Unterschied der Mittelwerte der Farbkennwerte a^* und b^* sowie der Helligkeit L^* zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern höchst signifikant.

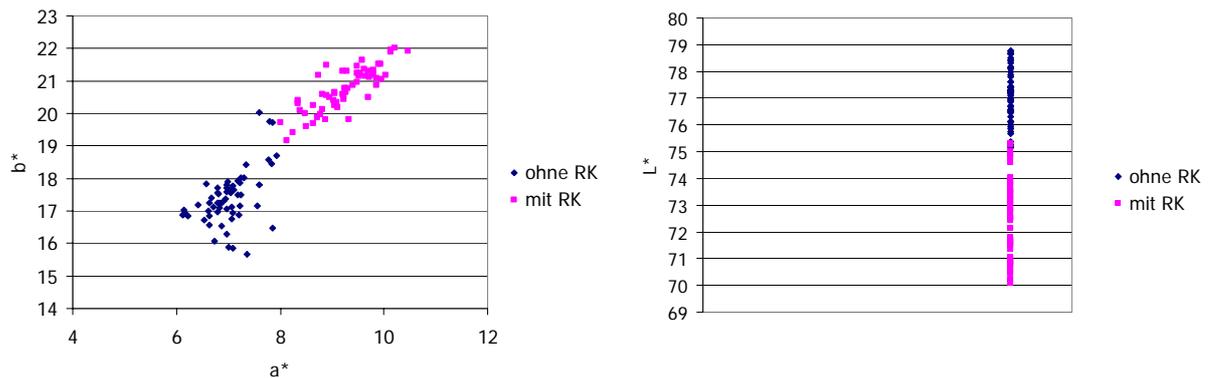


Diagramm 5: Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des rotkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Rotkern von unbehandelter Buche. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des rotkernigen und des Probenkollektives ohne Rotkern unbehandelter Buche. RK = Rotkern

Deutlich ist der Farbunterschied in Abbildung 18 auch visuell erkennbar. Der rechte Teil erscheint heller und homogener in seiner Farbe. Der linke Teil (Rotkern) des Holzmusters ist deutlich dunkler, mit dunklen Streifen durchzogen und wirkt inhomogener. Das zeigt sich auch durch die grössere Standardabweichung des L^* -Wertes von den Proben mit Rotkern im Vergleich zu den Proben ohne Rotkern (Siehe Tabelle 14).

Die Helligkeitsdifferenz ΔL , sowie die Farbdifferenz ΔE zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern, so wie sie in Tabelle 15 aufgeführt sind, weisen im unbehandelten Zustand einen deutlichen Betrag auf. Durch die thermische Behandlung sollten die Farb-, sowie auch die Helligkeitsdifferenzen abnehmen. Sind beide Werte null, so besteht kein Unterschied in Farbe und Helligkeit.



Abbildung 18: Das verwendete Buchenholz mit Rotkern vor der thermischen Behandlung

Tabelle 14: Farbkennwerte L*, a* und b* der unbehandelten Buchenproben. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern

Probenanzahl: 60 Anzahl Messungen: 240	L*		a*		b*	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
ohne RK	77.11	0.96	7.00	0.44	17.39	0.85
mit RK	72.48	1.44	9.25	0.57	20.75	0.67

Tabelle 15: Helligkeitsdifferenz ΔL und Farbdifferenz ΔE zwischen der rotkernigen Buche und der Buche ohne Rotkern im unbehandelten Ausgangszustand. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung

Probenanzahl: 60 Anzahl Messungen: 240	ΔL		ΔE	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Buche unbehandelt	4.63	1.79	6.25	1.87

Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-5 des Anhanges aufgeführt.

5.1.1.2 Holzfarbe des thermisch behandelten Buchenholzes

Die Farbmesswerte bei 160° C zeigen eine deutliche Egalisierung zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern. Jedoch ist das Ausmass der Verfärbung sehr gering, wie das in Abbildung 19 zu erkennen ist.



Abbildung 19: Obere Reihe: Buche mit Rotkern, untere Reihe: Buche ohne Rotkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/160°C, behandelt 12h/160°C, behandelt 24h/160°C

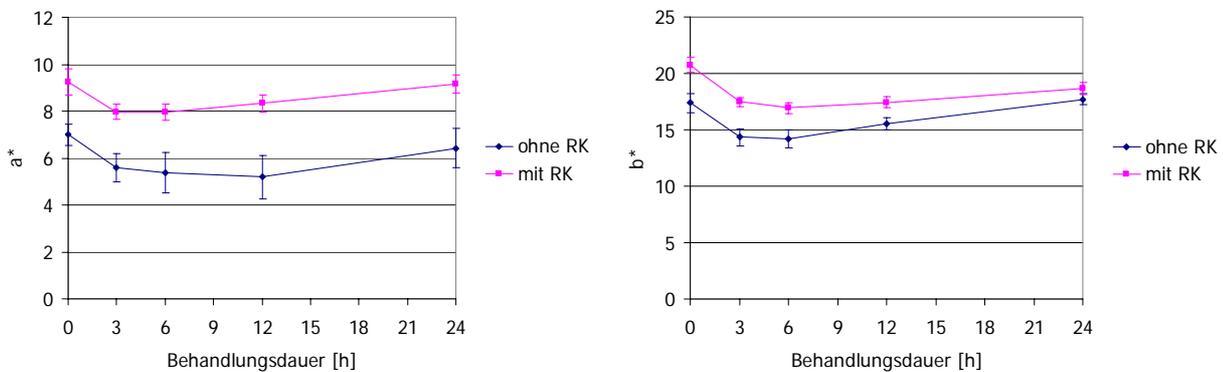


Diagramm 6: links a*-Werte und rechts b*-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern

In Diagramm 6 nehmen die a^* -Werte sowie die b^* -Werte in den ersten 6 h ab. Somit tendieren sie in die Grün- bzw. Blaurichtung. Im weiteren Verlauf der Behandlung steigen beide Werte an und nähern sich nach 24 h Behandlungszeit den Ausgangswerten. Zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern ist bei den a^* -Werten keine Angleichung festzustellen. Hingegen laufen die b^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern mit zunehmender Behandlungszeit zusammen.

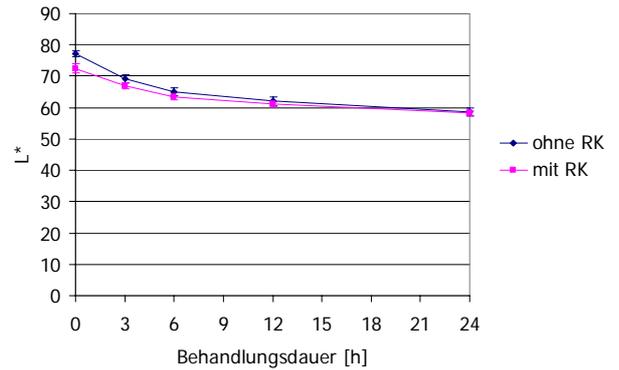


Diagramm 7: L^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern

Was die Farbänderung am meisten beeinflusst ist die Änderung der Helligkeit und somit der L^* -Werte (siehe Diagramm 7). Diese nehmen zu Beginn, bis ca. 6 h, stärker ab als im weiteren Verlauf der Behandlung. Die Helligkeit nimmt ab und das Holz wird dunkler. Nach 12 h Behandlungszeit sind die Kurven von Buche ohne Rotkern und von Buche mit Rotkern praktisch deckungsgleich. Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-6 des Anhanges aufgeführt.

Die Farbänderung bei 180° C ist wesentlich stärker als bei 160° C (siehe. Abbildung 20). Durch die Behandlung lässt sich ein dunkles Braun sowohl bei Buche ohne Rotkern als auch bei Buche mit Rotkern erreichen.

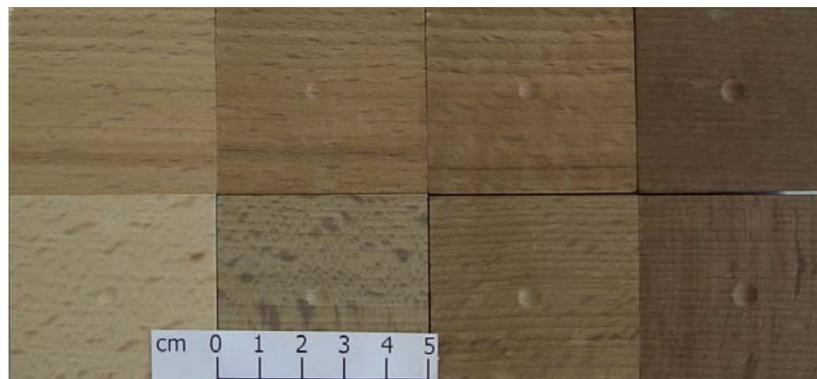


Abbildung 20: Obere Reihe: Buche mit Rotkern, untere Reihe: Buche ohne Rotkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/180°C, behandelt 12h/180°C, behandelt 24h/180°C.

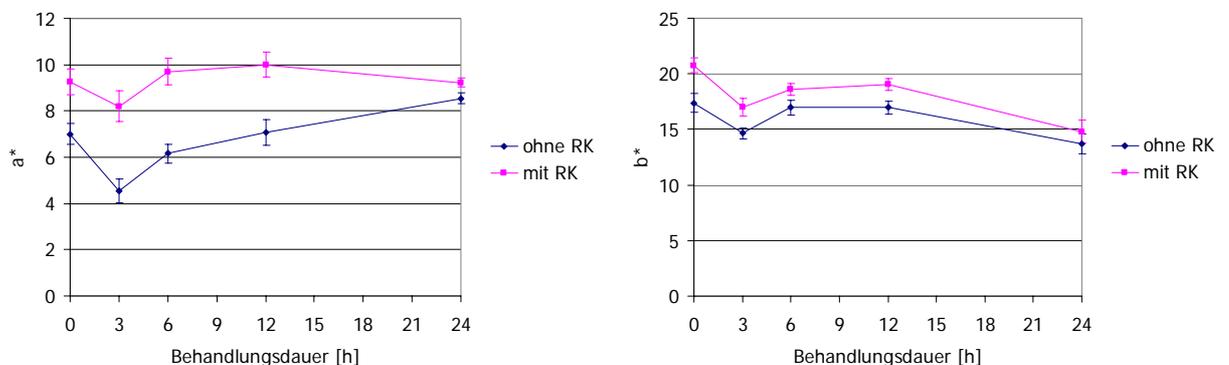


Diagramm 8: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern

Bei der Behandlung mit 180° C zeigen die a*- und b*-Werte in Diagramm 8 nach 3 h einen deutlichen Rückgang auf, ähnlich wie bei der Behandlung mit 160° C. Danach steigen die a*-Werte in die Rotrichtung an und liegen bis zum Schluss der Behandlung in der Nähe der Ausgangsposition. Hier kommen sich die a*-Werte von Buche ohne Rotkern und der Buche mit Rotkern deutlich näher im Gegensatz zu den b*-Werten, wo die Kurven von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern annähernd parallel verlaufen. Nach 24 h Behandlungszeit weisen diese einen deutlich höheren Blauanteil auf.

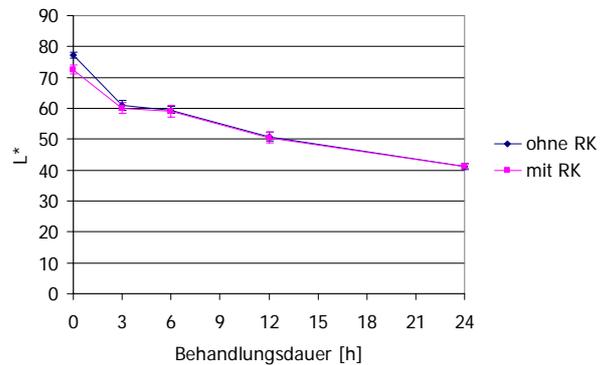


Diagramm 9: L*-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern

Die Abnahme der L*-Werte ist auch bei 180° C Behandlungstemperatur zu Beginn der Behandlung am grössten (Diagramm 9). In den ersten 3 h treten 46 % des gesamten Helligkeitsrückganges ein. Die Kurven von Buche ohne und mit Rotkern liegen schon nach 3 h sehr nahe beieinander und zeigen bis zum Schluss der Behandlung nur eine kleine Abweichung voneinander. Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-7 des Anhanges aufgeführt.

5.1.1.3 Egalisierungseffekt bei Buche

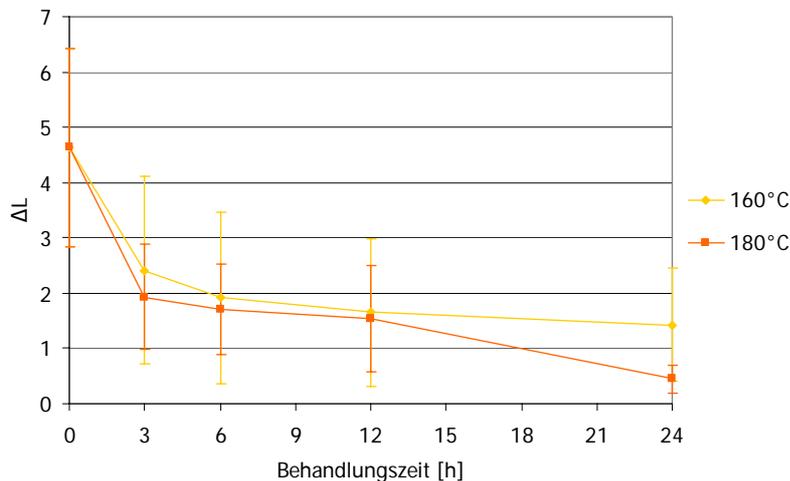


Diagramm 10: Helligkeitsdifferenz ΔL zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160° C und 180° C Behandlungstemperatur

Die Helligkeitsdifferenz zwischen Buche ohne und mit Rotkern nimmt mit zunehmender Behandlungszeit deutlich ab (Diagramm 10). Von anfänglich ΔL = 4.63 ist nach 24 h Behandlungszeit mit 160° C ΔL noch 1.02 und mit 180° C Behandlungstemperatur noch 0.26. Visuell ist der Helligkeitsunterschied nicht mehr wahrnehmbar. Die Helligkeitsangleichung findet in den ersten 6 h ihr grösstes Ausmass und ist ausgeprägter bei der Behandlung mit 180° C im Vergleich zu 160° C.

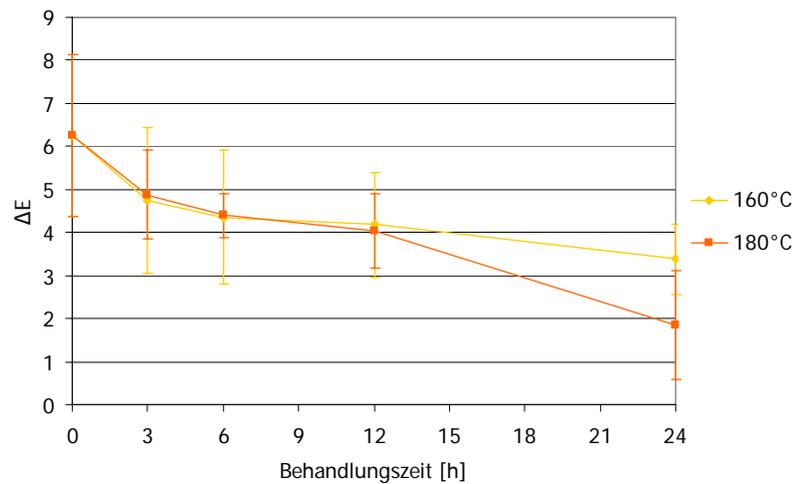


Diagramm 11: Farbdifferenz ΔE zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160° C und 180° C Behandlungstemperatur

Wenn man in Diagramm 11 die Farbdifferenz von 180° C betrachtet, so stellt man fest, dass die Egalisierung zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in zwei Phasen während der Behandlung sehr ausgeprägt ist und in einer Phase nur einer kleinen Veränderung unterliegt. Zwischen 6 und 12 h Behandlungszeit findet kaum eine Angleichung statt. Vorher und nachher ist die Egalisierung grösser. Bei 160° C fällt die Egalisierung bis zum Schluss der Behandlung deutlich kleiner aus als im Vergleich zu 180° C.

Um abschliessend ein Urteil über die Farbegalisierung zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern machen zu können, wird eine visuelle Betrachtung der Holzfarbe über eine wesentlich grössere Holzoberfläche als es die Farbmessprüfkörper aufweisen durchgeführt. Hier stellt man fest, dass sich die dunklen Streifen des Rotkernes sich durch die thermische Behandlung nicht gleich verfärben wie das umliegende Holz. Wie aus Abbildung 21 ersichtlich weisen nach der Behandlung diese Streifen einen hellen Farbton auf und heben sich gut erkennbar ab.



Abbildung 21: Links: Buchenlamelle mit Rotkernanteil, unbehandelt. Mitte: Buchenlamelle mit Rotkernanteil behandelt während 12 h bei 180° C. Rechts Buchenlamelle behandelt während 24 h bei 180° C. Rotkernanteil markiert durch den Pfeil

5.1.1.4 Holzfarbe des unbehandelten Eschenholzes

In Diagramm 12 sind die Farbwerte von unbehandelter Esche aufgeführt. Im unbehandelten Ausgangszustand unterscheiden sich Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in der Farbe sehr deutlich. Im Mittel weist Esche ohne Braunkern einen tieferen b^* -Wert auf als Esche mit Braunkern. Sie tendiert mehr in Blaurichtung des $L^*a^*b^*$ -Farbraumes. Der Braunkern hingegen erreicht höhere a^* -Werte, tendiert also mehr in die Rotrichtung. Die Helligkeit ist bei Esche ohne Braunkern deutlich höher als bei Esche mit Braunkern und liegt somit näher bei Weiss. Gemäss t-Test ist der Unterschied der Mittelwerte der Farbkennwerte a^* und b^* sowie der Helligkeit L^* zwischen Eschensplint und Eschenbraunkern höchst signifikant.

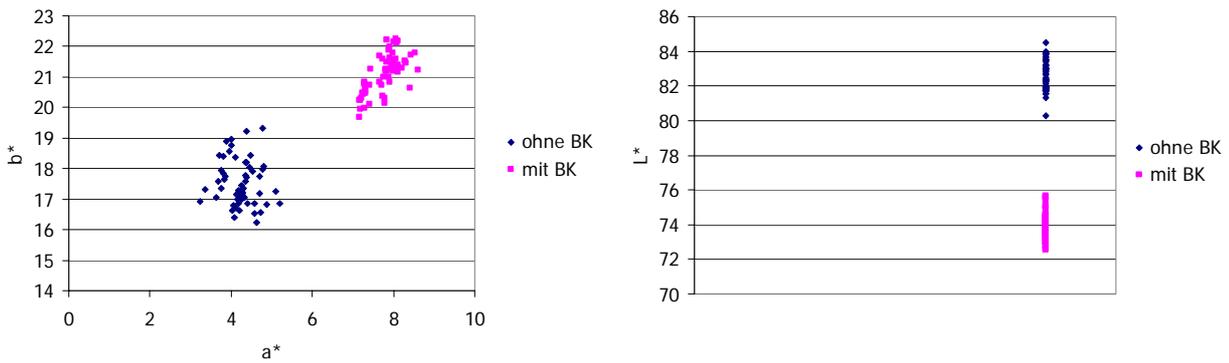


Diagramm 12: Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des braunkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Braunkern von unbehandelter Esche. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des braunkernigen und des Probenkollektives ohne Braunkern unbehandelter Esche. BK = Braunkern

Unverkennbar ist der Farbunterschied von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abbildung 22 zu sehen. Der linke Teil des Holzmusters, der den Braunkern darstellt, ist deutlich dunkler. Die Esche ohne Braunkern ist weisslich hell und hebt sich klar vom Braunkern ab. Sowie die Esche mit Braunkern als auch die Esche ohne Braunkern haben eine homogene Farbe ohne auffällige Unregelmässigkeiten. Die Streuungen der $L^*a^*b^*$ -Werte der Esche ohne Braukern und der Esche mit Braunkern zeigen keine relevanten Unterschiede untereinander (Siehe Tabelle 16).

Die Helligkeitsdifferenz ΔL , sowie die Farbdifferenz ΔE zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern, so wie sie in Tabelle 17 aufgeführt sind, weisen im unbehandelten Zustand einen deutlichen Betrag auf.



Abbildung 22: Das verwendete Eschenholz mit Braunkern vor der thermischen Behandlung

Tabelle 16: Farbkennwerte L*, a* und b* der unbehandelten Eschenproben: \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern.

Probenanzahl: 57 Anzahl Messungen: 228	L*		a*		b*	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
ohne BK	82.57	0.87	4.24	0.39	17.52	0.74
mit BK	73.93	0.74	7.78	0.38	21.09	0.65

Tabelle 17: Helligkeitsdifferenz ΔL und Farbdifferenz ΔE des braunkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Braunkern von unbehandelter Esche.

Probenanzahl: 57 Anzahl Messungen: 228	ΔL		ΔE	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Esche unbehandelt	8.64	1.24	10.06	1.26

Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-8 des Anhangs aufgeführt.

5.1.1.5 Holzfarbe des thermisch behandelten Eschenholzes

Der Farbunterschied zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern ist bei 160° C nach bereits 6 h Behandlungszeit visuell kaum mehr erkennbar (vgl. Abbildung 23). Jedoch ist das Ausmass der Dunkelfärbung gering.



Abbildung 23: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/160°C, behandelt 12h/160°C, behandelt 24 h/160°C

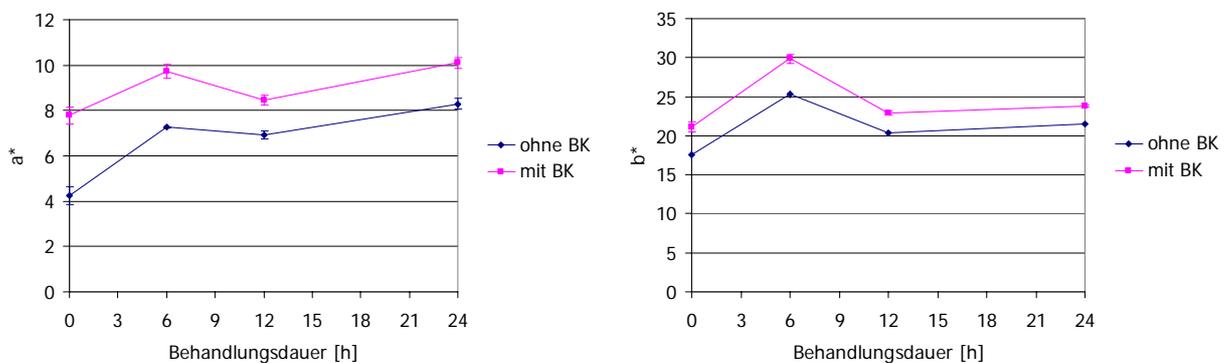


Diagramm 13: links a*-Werte und rechts b*-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

In den ersten 6 h nehmen die a^* -Werte sowie die b^* -Werte in Diagramm 13 zu. Somit tendieren sie in die Rot- bzw. Gelbrichtung. Im weiteren Verlauf der Behandlung sinken die a^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern um wenige Einheiten danach steigen die beiden Kurven parallel und erreichen nach 24 h den höchsten Rotanteil. Die b^* -Werte sinken nach 12 h Behandlungzeit in die Nähe der Ausgangswerte und steigen in den nächsten 12 h gering Richtung gelb an.

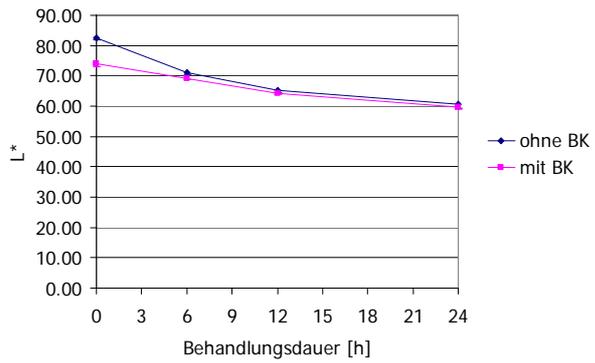


Diagramm 14: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

Die Abnahme der Helligkeit ist speziell bei Esche ohne Braunkern in den ersten 6 h am grössten und nimmt mit zunehmender Behandlungsdauer weniger ausgeprägt ab. Esche mit Braunkern unterliegt dem Dunkel werden gleichmässiger. Die Kurven von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern kommen sich nach 6 h deutlich näher. Jedoch kommt es zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern bis zum Ende der Behandlung nicht zu einem vollständigen Helligkeitsausgleich (Diagramm 14). Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-9 des Anhanges aufgeführt.

Die Farbänderungen bei 180° C sind stärker als bei 160° C. Durch die Behandlung lässt sich ein dunkles Rotbraun sowohl bei Esche ohne Braunkern als auch bei Esche mit Braunkern erreichen (Abbildung 24).



Abbildung 24: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/180°C, behandelt 12h/180°C, behandelt 24h/180°C

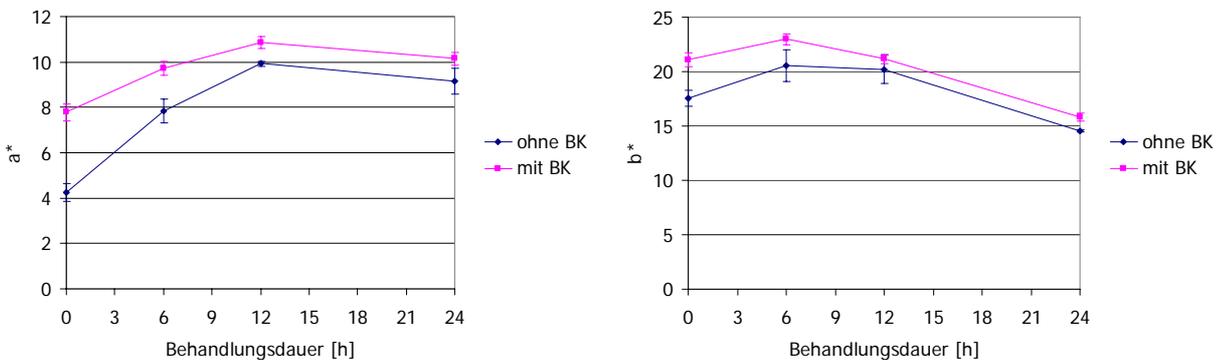


Diagramm 15: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

Die a^* -Werte in Diagramm 15 weisen nach 12 h Behandlungszeit einen deutlich höheren Rotanteil auf. Nach weiteren 12 h Behandlung bleiben diese Werte nahezu konstant. Die b^* -Werte gehen anfänglich in die Gelbrichtung und fallen nach 24 h Behandlungsdauer deutlich unter die Ausgangswerte in die Blaurichtung. Durch die thermische Behandlung kommen sich die Blau-Gelb- (b^*) bzw. Grün-Rot- (a^*) Anteile von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern etwas näher.

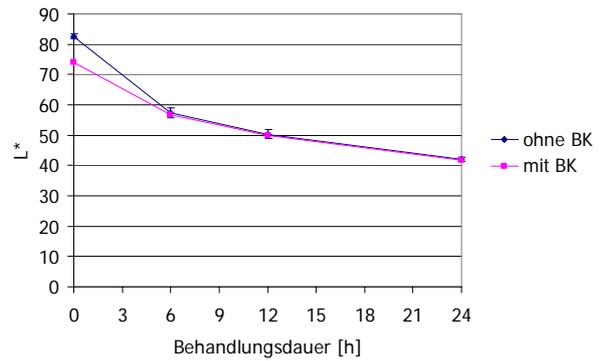


Diagramm 16: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

Die Helligkeitswerte in Diagramm 16 nehmen im Vergleich zur Behandlung bei 160° C stärker ab. In den ersten 6 h der Behandlung treten 58 % des gesamten Helligkeitsrückganges ein. In den ersten 6 h findet auch der grösste Teil des Helligkeitsausgleiches zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern statt. Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-10 des Anhanges aufgeführt.

Die Behandlung bei 200° C (siehe Abbildung 25) zeigt eine sehr starke Dunkelfärbung bereits in den ersten 6 h. Sie ist wesentlich stärker als die Verfärbung bei 180° C nach 24 h. Die Farbe geht in Richtung schwarzbraun.



Abbildung 25: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/200°C, behandelt 12h/200°C, behandelt 24h/200°C

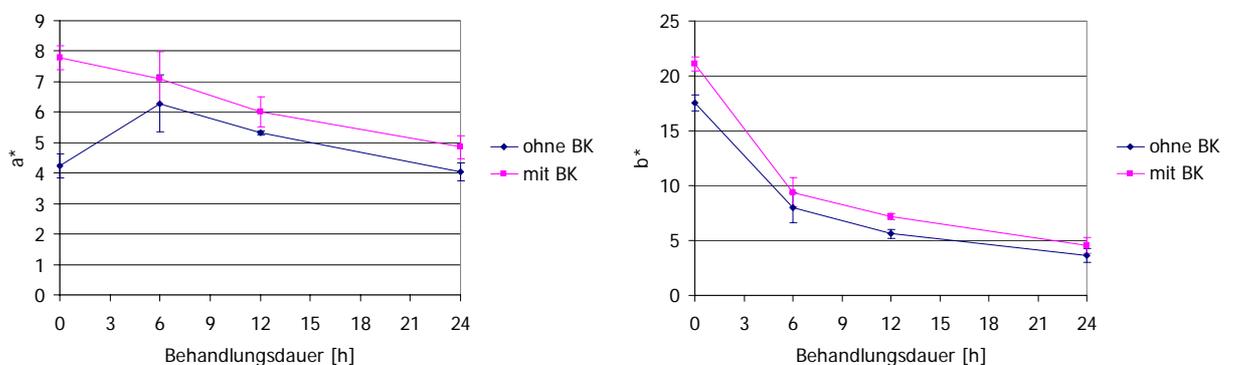


Diagramm 17: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.

Die a^* -Werte in Diagramm 17 gleichen sich in den ersten 6 h stark an, wobei Esche mit Braunkern in die Grünrichtung geht und Esche ohne Braunkern in die Rotrichtung. Danach bewegen sich beide Kurven parallel in die Grünrichtung. Die b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern hingegen kommen sich nur sehr gering näher. Nach 24 h Behandlungzeit verlieren die Prüfkörper fast alle ihre Gelbanteile.

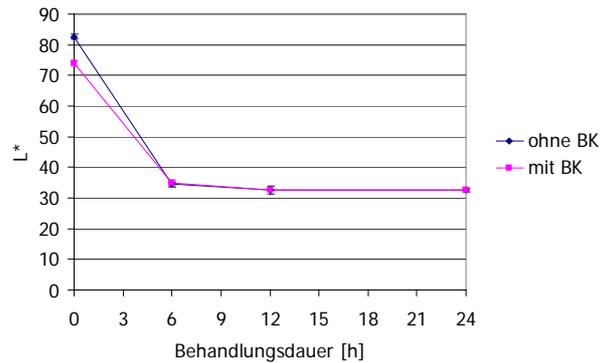


Diagramm 18: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

Bei 200° C erfolgen die Helligkeitsabnahme und die Helligkeitsangleichung zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern zu 95 % in den ersten 6 h. Die weitere Behandlung hat auf die Helligkeit keinen wesentlichen Einfluss mehr (siehe Diagramm 18). Die Farbwerte der einzelnen Prüfkörper sind in Tabelle A-11 des Anhanges aufgeführt.

5.1.1.6 Egalisierungseffekt bei Esche

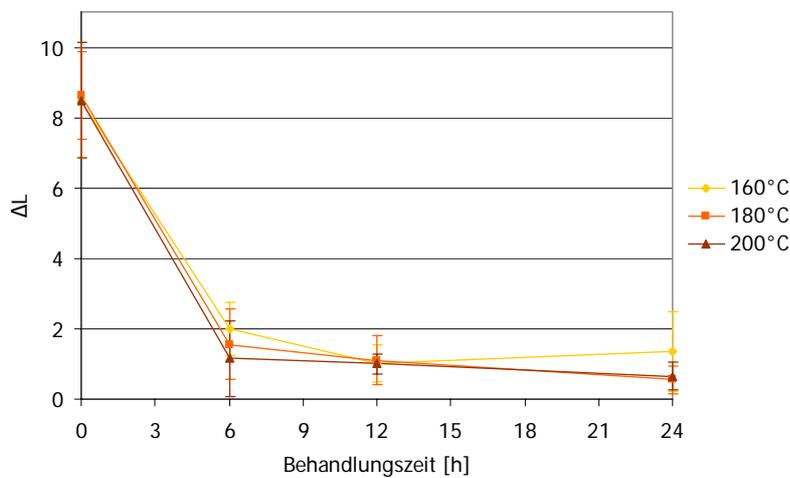


Diagramm 19: Helligkeitsdifferenz ΔL von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160, 180 und 200° C Behandlungstemperatur

Die Helligkeitsdifferenz zwischen Esche ohne und mit Braunkern, so wie sie in Diagramm 19 dargestellt ist, nimmt mit zunehmender Behandlungsdauer deutlich ab. Von anfänglich $\Delta L = 8.49$ ist nach 24 h Behandlungsdauer bei allen Temperaturstufen die Helligkeitsdifferenz praktisch null und vom Auge kaum mehr wahrnehmbar. Die Helligkeitsangleichung findet in den ersten 6 h ihr grösstes Ausmass. Danach bewegen sich die Werte bei 180° C und 200° C annähernd unverändert weiter.

Wenn man die gesamte Farbdifferenz in Diagramm 20 betrachtet, so stellt man fest, dass alle Temperaturstufen eine Egalisierung zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern zur Folge haben. Die verschiedenen Temperaturstufen verhalten sich dabei ähnlich. Am grössten ist der Farbangleich zwischen Esche ohne und mit Braunkern in den ersten 6 h. Zusätzliche 6 h Behandlung bringen einen weiteren Egalisierungseffekt. Danach verläuft die thermische Behandlung auf allen Temperaturstufen beinahe ohne weitere Farbegalisierung.

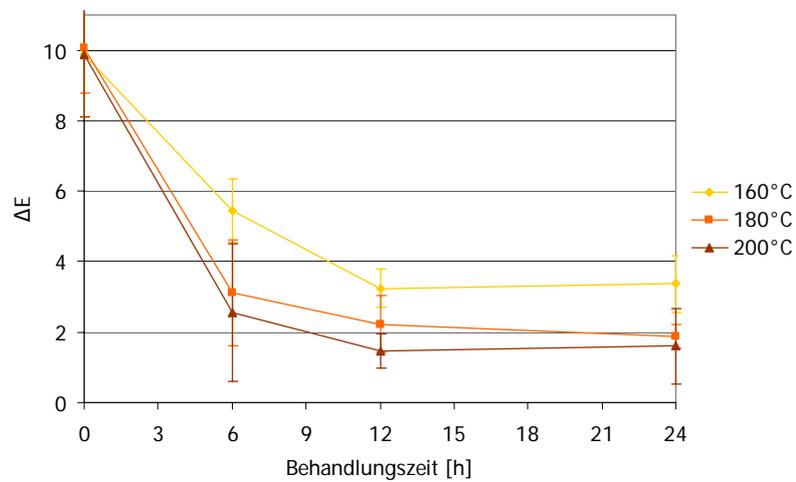


Diagramm 20: Farbdifferenz ΔE zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160, 180 und 200° C Behandlungstemperatur.

In Abbildung 26 sind drei verschiedene Eschenholzmuster mit Braunkernanteil dargestellt. Während sich im unbehandelten Muster (erstes von links) der Braunkern deutlich abzeichnen weisen die zwei weiteren Eschenholzmuster nach der thermischen Behandlung visuell keine Farbunterschiede mehr auf.

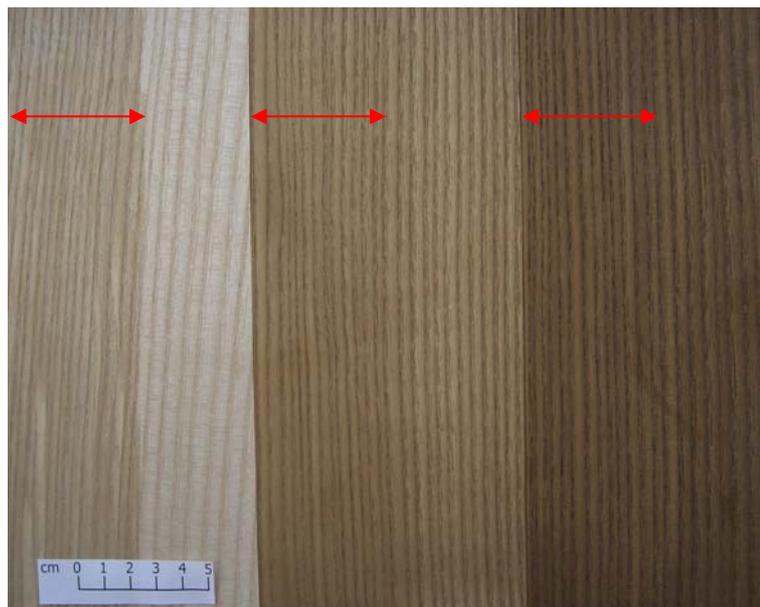


Abbildung 26 Links: Eschenlamelle mit Braunkernanteil, unbehandelt. Mitte: Eschenlamelle mit Braunkernanteil behandelt während 6 h bei 180° C. Rechts Eschenlamelle behandelt während 24 h bei 180° C. Braunkernanteil markiert durch den Pfeil.

5.1.1.7 Diskussion

Die starke Helligkeitsänderung in die Schwarzrichtung ist das wichtigste Merkmal der Farbänderung einer thermischen Behandlung von Holz. Dabei spielen die T-u-Verfärbungen die Hauptrolle. Hauptträger der T-u-Verfärbungen sind nach Kollmann et al. [60] das Lignin, das durch die Hydrolyse der Lignin-Kohlenhydrat-Bindung isoliert wird sowie die Pentosane. Isoliertes Lignin erscheint braun und die Pentosane wandeln sich in dunkel gefärbte Harze um. Eine gewisse Bedeutung bei der Helligkeitsabnahme kommt dem Holzzucker zu. Er wird unter Einwirkung von Wärme karamellisiert und bekommt eine braune Farbe.

5.1.2 Farbstabilität

5.1.2.1 Farbstabilität von Buche



Abbildung 27: Buchenproben mit Rotkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Von links nach rechts: Unbehandelt, thermisch behandelt bei 6h/180°C, thermisch behandelt bei 12h/180°C und thermisch behandelt bei 24h/180°C. Obere 2/3 der Probenfläche bestrahlt unteres Drittel der Probenfläche unbestrahlt

Die Helligkeitsdifferenz bzw. Farbdifferenz, wie sie in Diagramm 21 und Diagramm 22 dargestellt sind, zeigen die Farb- bzw. Helligkeitsunterschiede zwischen den Proben im unbestrahltem Zustand und den Proben nach der Bestrahlung. Je grösser die Werte sind, desto grösser ist auch die Farbänderung die aus der UV-Bestrahlung hervorgeht.

Die Helligkeitsdifferenz sowie die Farbdifferenz infolge der Bestrahlung folgen bei allen Proben, die mit 180° C behandelt worden sind derselben Tendenz. Die Differenz beider Werte nimmt mit zunehmender Bestrahlungsdauer stetig zu. Zu Beginn der Bestrahlung ist die Differenzsteigerung der Helligkeit sowie der Farbe etwas grösser und flacht gegen Ende der Bestrahlung leicht ab. Die unbehandelte Probe hingegen unterliegt der Helligkeits- sowie der Farbänderung in den ersten 48 h der UV-Bestrahlung am stärksten. Im weiteren Verlauf der Bestrahlung ändern sich die Werte der unbehandelten Probe nur noch geringfügig.

Während die thermisch behandelten Proben durch die Bestrahlung heller werden dunkelt der unbestrahlte Prüfkörper nach (siehe Abbildung 27). Der thermisch am schwächsten behandelte Prüfkörper (6h/180°C) unterliegt dem Prozess der UV-Verfärbung am geringsten. Nach 432 Stunden Bestrahlungszeit weist diese Probe nur gerade 49 % der Helligkeitsdifferenz der Probe behandelt bei 24h/180°C und 62 % der Helligkeitsdifferenz der unbestrahlten Probe auf. Bei der Farbdifferenz weist der Prüfkörper behandelt bei 6h/180°C nur 51 % der Farbänderung der unbestrahlten Probe auf.

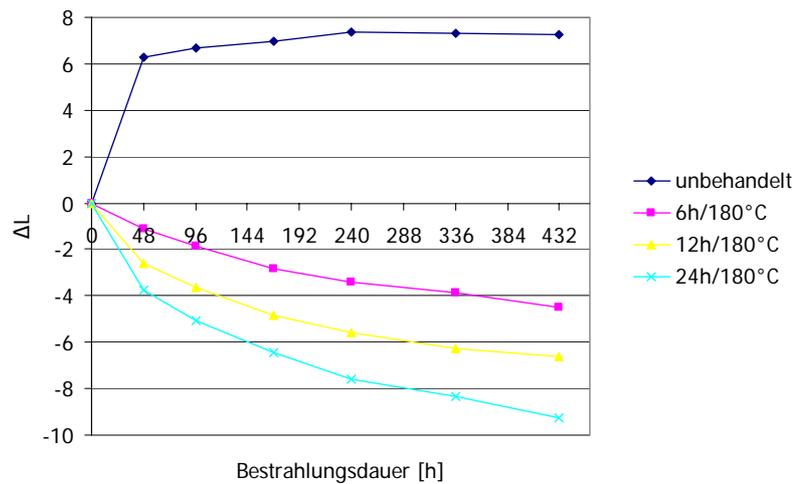


Diagramm 21: Helligkeitsdifferenz ΔL von thermisch behandelter Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche

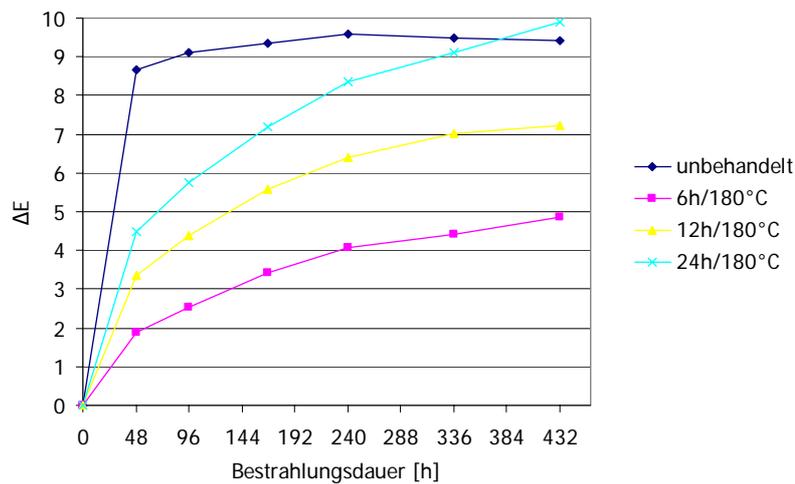


Diagramm 22: Farbdifferenz ΔE von thermisch behandelter Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche

Je stärker die thermische Behandlung und folglich je dunkler das Holz ist, desto stärker ändert sich die Farbe durch die UV-Bestrahlung. Nach 432 h Bestrahlung liegt die Farbdifferenz der am stärksten thermisch behandelten Probe (24h/180°C) mit $\Delta E = 9.88$ leicht über der Farbdifferenz der unbehandelten Probe mit $\Delta E = 9.43$. Die Farbkennwerte zur künstlichen Bestrahlung sind in Tabelle A-12 des Anhanges aufgeführt.

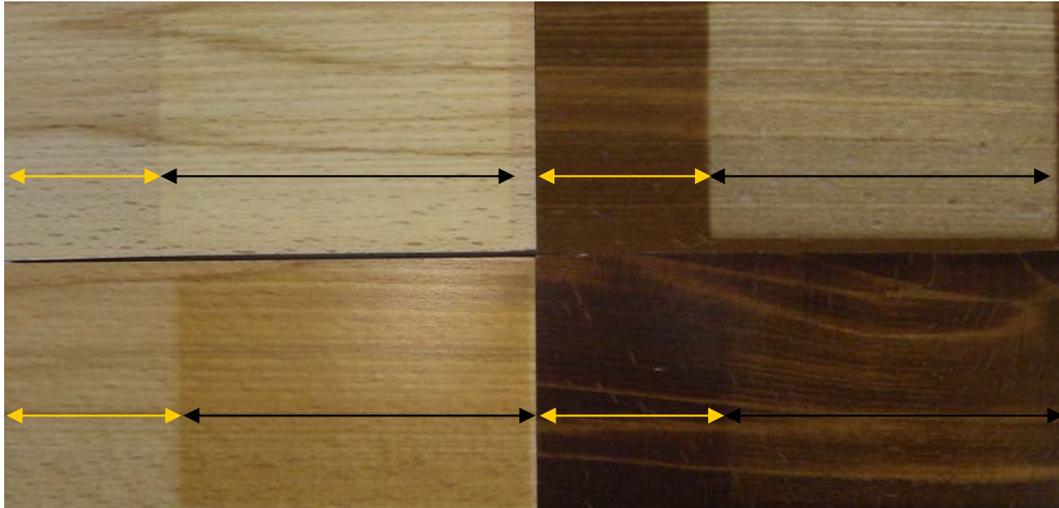


Abbildung 28: Versiegelte Buchenproben mit Rotkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Oben: Wasserlack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Unten: Acryllack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Gelber Pfeil markiert den unbestrahlten Bereich, schwarzer Pfeil markiert den bestrahlten Bereich

Betrachtet man die versiegelten Proben (Abbildung 28 sowie Diagramm 23 und Diagramm 24), so fällt auf, dass der Wasserlack auf thermisch behandeltem Holz mit der grössten Helligkeits- und Farbdifferenz abschneidet. Vergleicht man die beiden Versiegelungssysteme jedoch auf unbehandeltem Holz so weist der Wasserlack das stabilere Farbverhalten, mit kleinern Helligkeits- und Farbdifferenzen gegenüber dem Acryllack, auf. Unbehandeltes Buchenholz, das mit Wasserlack versiegelt ist, weist eine Helligkeitszunahme auf. Unbehandeltes Buchenholz mit einer Acryllackversiegelung weist hingegen eine Helligkeitsabnahme auf. Auf thermisch behandeltem Buchenholz nimmt bei beiden Versiegelungssystemen die Helligkeit zu.

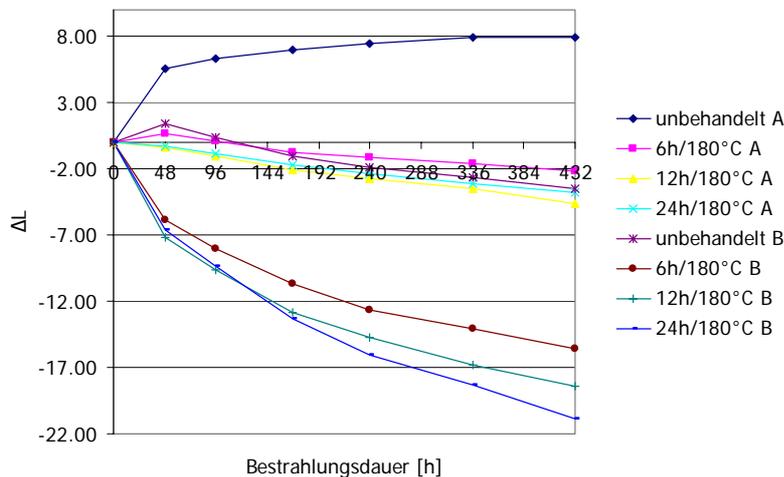


Diagramm 23: Helligkeitsdifferenz ΔL von versiegelter, thermisch behandelter Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche. A = Acryllack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)

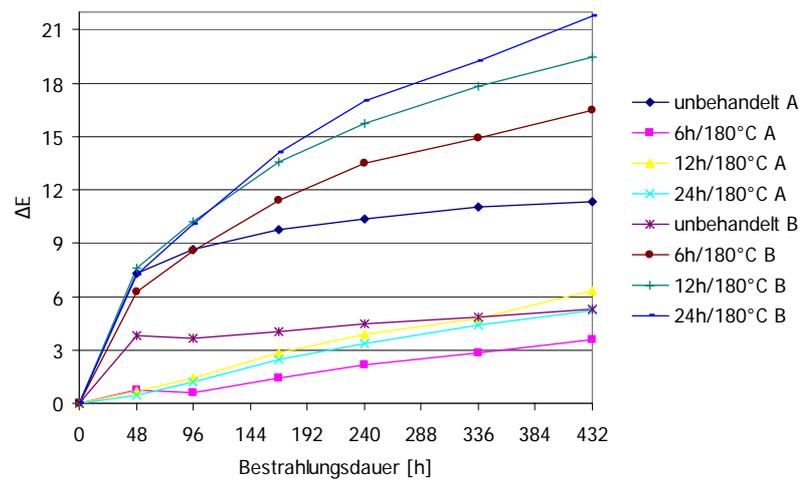


Diagramm 24: Farbdifferenz ΔE von versiegelter, thermisch behandelter Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche. A = Acrytlack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)

Die Farbkennwerte der künstlichen Bestrahlung von den versiegelten Proben sind in Tabelle A-13 und Tabelle A-14 des Anhanges aufgeführt.

5.1.2.2 Farbstabilität von Esche

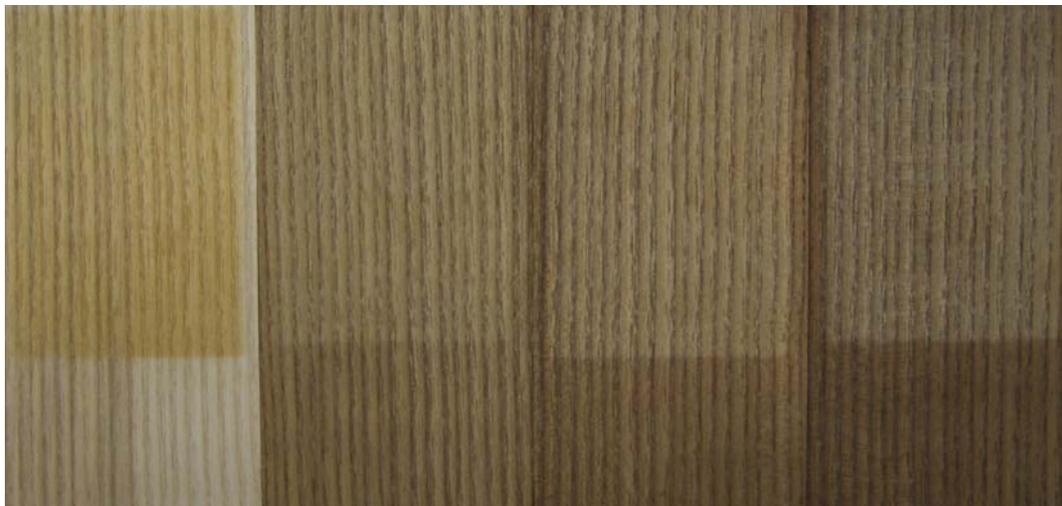


Abbildung 29: Eschenproben mit Braunkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Von links nach rechts: Unbehandelt, thermisch behandelt bei 6h/180°C, thermisch behandelt bei 12h/180°C, thermisch behandelt bei 24h/180°C. Obere 2/3 der Probenfläche bestrahlt unteres Drittel der Proben unbestrahlt

Die Helligkeits- sowie die Farbdifferenz infolge der UV-Bestrahlung folgen bei allen Proben bei 180°C derselben Tendenz (siehe Diagramm 25 und Diagramm 26). Die Farb- sowie die Helligkeitsdifferenz nimmt mit zunehmender Bestrahlungsdauer stetig zu. Zu Beginn der Bestrahlung ist die Differenzsteigerung der Helligkeit sowie der Farbe etwas grösser und flacht gegen Ende der Bestrahlung leicht ab. Die unbehandelte Probe hingegen unterliegt der Helligkeits- sowie der Farbänderung in den ersten 48 bis 96 h der UV-Bestrahlung am stärksten. Im weiteren Verlauf der Bestrahlung steigern sich die Werte der unbehandelten Probe nur noch gering.

Während die thermisch behandelten Proben durch die Bestrahlung heller werden, dunkelt der unbehandelte Prüfkörper nach (siehe Abbildung 29). Der thermisch am schwächsten behandelte Prüfkörper (6h/180°C) unterliegt dem Prozess der UV-Verfärbung am geringsten. Nach 432 h Bestrahlungszeit weist diese Probe nur gerade 41 % der Helligkeitsdifferenz der Probe behandelt bei 24h/180°C und 49 % der Helligkeitsdifferenz der unbehandelten Probe auf. Bei der Farbdifferenz weist der Prüfkörper behandelt bei 6h/180°C nur 31 % der Farbänderung der unbehandelten Probe auf.

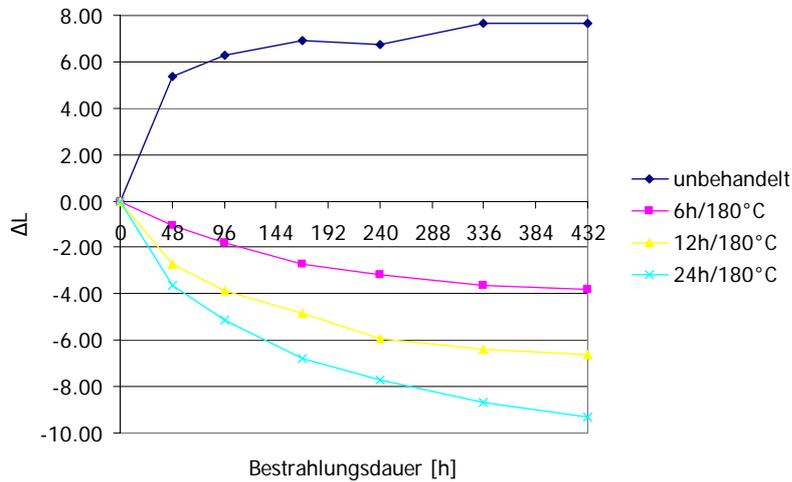


Diagramm 25: Helligkeitsdifferenz ΔL von thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche

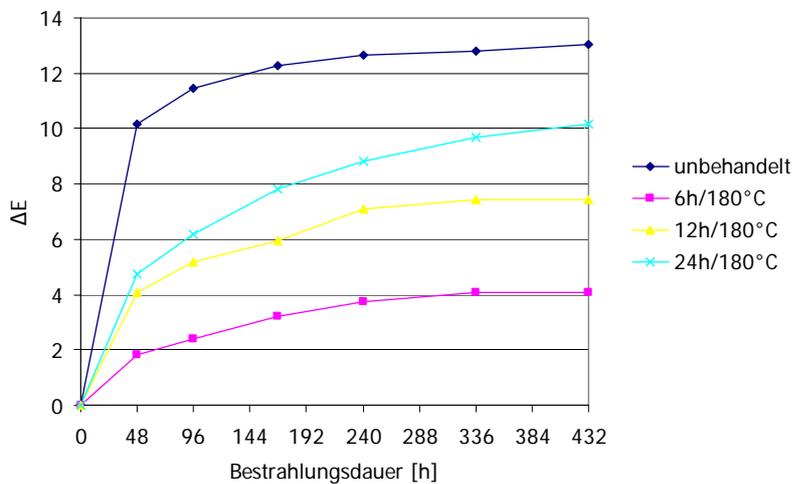


Diagramm 26: Farbdifferenz ΔE von thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche

Je stärker die thermische Behandlung und folglich je dunkler das Holz ist, desto stärker ändert sich die Farbe durch die UV-Bestrahlung. Nach 432 h Bestrahlung liegt die Farbdifferenz der am stärksten thermisch behandelten Probe (24h/180°C) mit $\Delta E = 10.17$ immer noch deutlich unter der Farbdifferenz der unbehandelten Probe mit $\Delta E = 13.04$. Die Farbkennwerte der künstlichen Bestrahlung sind in Tabelle A-15 des Anhanges aufgeführt.

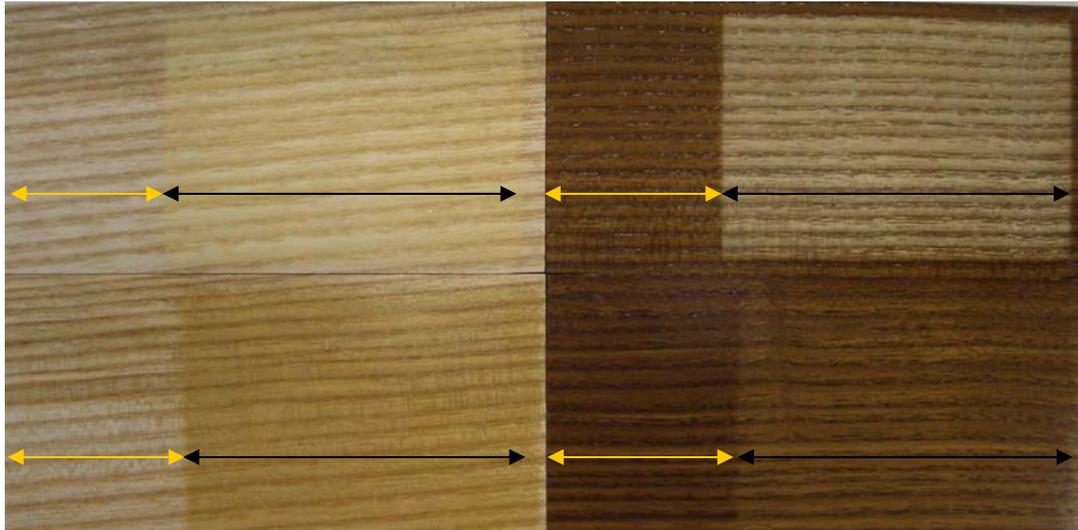


Abbildung 30: Versiegelte Eschenproben mit Braunkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Oben Wasserlack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Unten Acrylatlack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Gelber Pfeil markiert den unbestrahlten Bereich, schwarzer Pfeil markiert den bestrahlten Bereich

Vergleicht man die versiegelten Proben (Abbildung 30 sowie Diagramm 27 und Diagramm 28), so fällt auf, dass der Wasserlack auf thermisch behandeltem Holz mit der grössten Helligkeits- und Farbdifferenz abschneidet. Vergleicht man die beiden Versiegelungssysteme jedoch auf unbehandeltem Holz so weist der Wasserlack das stabilere Farbverhalten, mit kleineren Helligkeits- und Farbdifferenzen gegenüber dem Acrylatlack, auf. Unbehandeltes Eschenholz, das mit Wasserlack versiegelt ist, weist eine Helligkeitszunahme auf. Unbehandeltes Eschenholz mit einer Acrylatlackversiegelung weist hingegen eine Helligkeitsabnahme auf. Auf thermisch behandeltem Eschenholz nimmt bei beiden Versiegelungssystemen die Helligkeit zu.

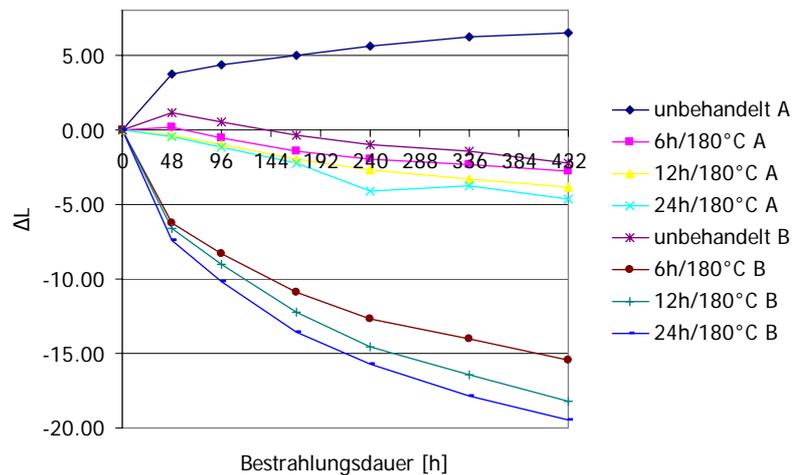


Diagramm 27: Helligkeitsdifferenz ΔL von versiegelter, thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche. A = Acrylatlack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)

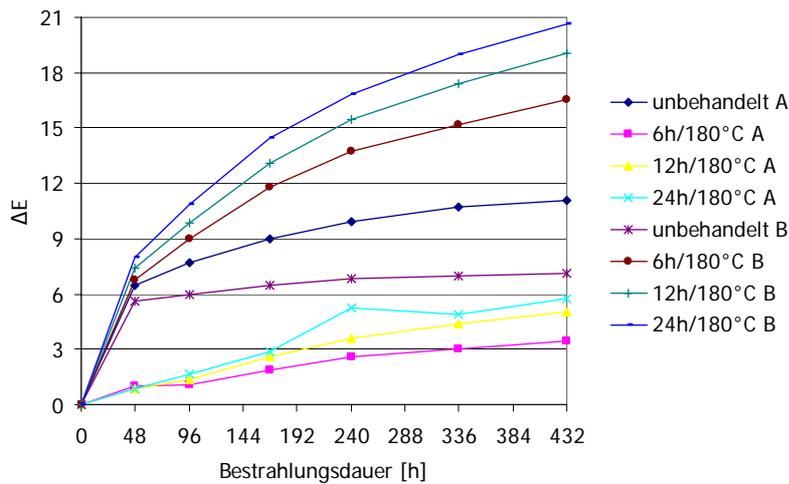


Diagramm 28: Farbdifferenz ΔE von versiegelter, thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche. A = Acrylatlack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)

Die Farbkennwerte der künstlichen Bestrahlung von den versiegelten Proben sind in Tabelle A-16 und Tabelle A-17 des Anhanges aufgeführt.

5.1.2.3 Diskussion

Thermisch behandeltes Holz vergraut. Es findet eine Helligkeitszunahme statt, ähnlich wie das bei der Freibewitterung zu beobachten ist. Unbehandeltes Holz hingegen vergilbt, wie das auch häufig bei holzhaltigen Faserstoffen mit hohem Ligninanteil (z.B. Papier) zu beobachten ist. Insbesondere das Lignin aber auch Holzinhaltstoffe wirken sich als farbverändernde Komponenten aus. Thermisch behandeltes Holz bringt trotz kleinerer Farb- und Helligkeitsdifferenzen visuell keine ausreichende farbstabilisierende Eigenschaft gegenüber der UV-Verfärbung mit sich.

Eine wesentliche Steigerung der Farbstabilität von thermisch behandeltem Holz bringt eine Versiegelung mittels Acrylatlack mit sich. Die mit Acrylatlack versiegelten thermisch behandelten Proben weisen über 50 % kleinere Farbdifferenzen auf als unbehandelte mit Acrylatlack versiegelte Proben. Die Wasserlackversiegelung hingegen bringt keine farbstabilisierende Wirkung auf Thermoholz. Im Gegenteil die Farbänderungen nehmen im Vergleich zu unbehandeltem, mit Wasserlack versiegeltem Holz zu.

Umgekehrt verhält es sich bei unbehandeltem Holz. Hier ist die Farbstabilität mit Wasserlack versiegelten Proben höher als mit Acrylatlack versiegelten Proben. Der verwendete Acrylatlack (lösemittelfrei) betont den Holzfarbton ebenso wie lösemittelhaltige Versiegelungen (z.B. PU-Lack) stärker. In Gegensatz dazu der Wasserlack, der den Holzfarbton nicht stärker hervorhebt. Bei der Verfärbung durch die UV-Bestrahlung verhält es sich ähnlich. Mit Wasserlack versiegelte Holzoberflächen vergilben erfahrungsgemäss weniger.

5.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften

5.2.1 Verhalten gegenüber Feuchte

5.2.1.1 Sorptionsverhalten und Quellung von Buche

Wie aus Diagramm 29 ersichtlich ist, ist die Sorptionsfähigkeit der thermisch behandelten Serien gegenüber der unbehandelten Serie deutlich vermindert. Buche ohne Rotkern sowie Buche mit Rotkern unterscheiden sich im Sorptionsverhalten kaum. Vergleiche zwischen den Serien werden über die Mittelwerte aus Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern durchgeführt. So beträgt die Gleichgewichtsfeuchte der Serie 24h/180° C bei der ersten Klimastufe (20°C/35% relative Luftfeuchte r.L.) 46 % und bei der letzten Klimastufe (20°C/93% r.L.) 76 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Gleichgewichtsfeuchten der Serien 12h/180°C und 6h/180°C betragen bei der ersten Klimastufe 51 % bzw. 61 % und bei der letzten Klimastufe 82 % bzw. 91 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Gleichgewichtsfeuchte der Serie 6h/200°C beträgt 46 % (1. Klimastufe) und 76 % (letzte Klimastufe) der Werte der unbehandelten Serie. Für die Proben der Serie 24h/160°C betragen die Werte der Gleichgewichtsfeuchte 58 % und 91 % der Feuchte der unbehandelten Proben. Die Werte der Holzfeuchte von Buche sind in Tabelle A-18 des Anhangs aufgeführt.

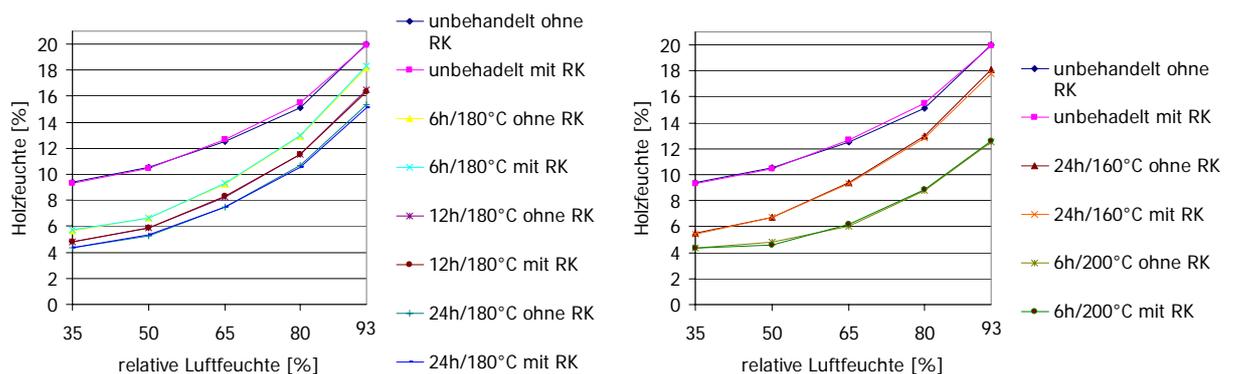


Diagramm 29: Sorptionsisothermen von Buche der Behandlungsserien von 180° C links, 160° C und 200° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern

Auch das Quellverhalten des Holzes wird durch die thermische Modifikation stark beeinflusst. So sind die Quellmasse aller thermisch behandelten Serien von Buche in radialer und in tangentialer Richtung niedriger als die Quellwerte der unbehandelten Serie. In Diagramm 30 und Diagramm 31 sind die festgestellten Quellmaße aller Serien dargestellt. Die unbehandelte Serie weist ein höheres Quellmass von Buche mit Rotkern im Vergleich zu Buche ohne Rotkern in radialer und tangentialer Richtung auf. Dieser Unterschied nimmt durch die thermische Behandlung ab. Der Unterschied von tangentialer und radialer Quellung von ca. 2:1 bleibt auch bei den wärmebehandelten Proben erhalten.

Bei der Serie 6h/200°C beträgt die Quellung 45 % bei der ersten Klimastufe und 61 % der letzten Klimastufe in radialer Richtung und 41 % (bei 20°C/35% r.L.) und 64 % (bei 20°C/93% r.L.) in tangentialer Richtung der Werte der unbehandelten Serie. Die Serien 12h/180°C und 24h/180°C liegen im Bereich der relativen Luftfeuchte bis ca. 65 % ähnlich wie die Serie 6h/200°C. Bei der letzten Klimastufe beträgt die radiale Quellung der Serie 24h/180°C 72 % und in tangentialer Richtung 73 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Werte der Quellung von Buche sind in Tabelle A-19 des Anhangs aufgeführt.

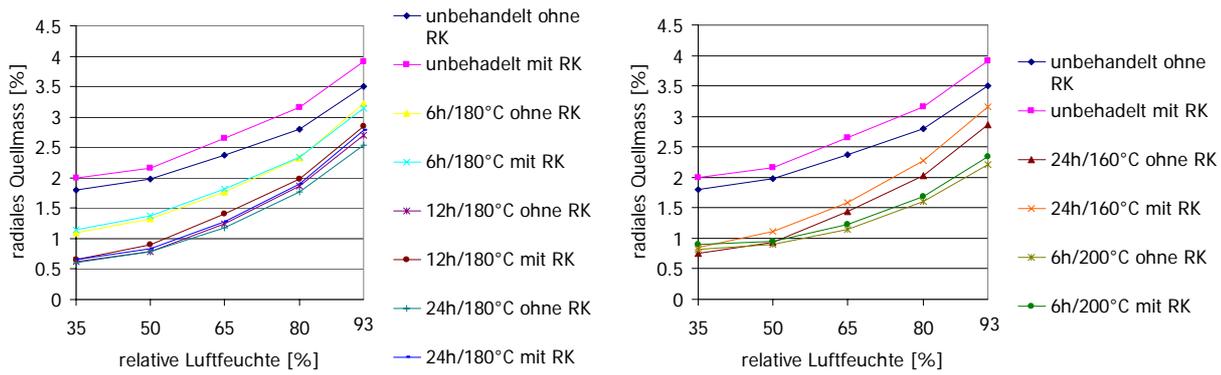


Diagramm 30: Quellmass von Buche in radialer Richtung der Behandlungsserien von 180° C links, 160°C und 200°C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern

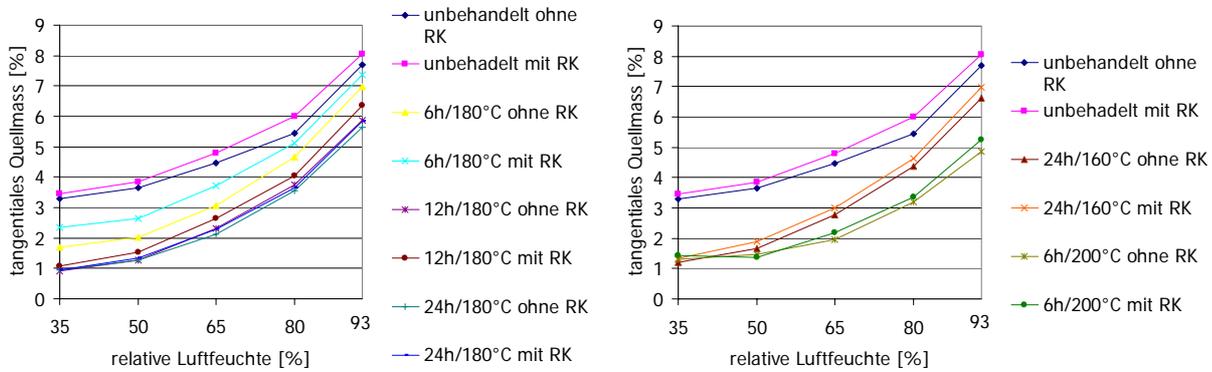


Diagramm 31: Quellmass von Buche in tangentialer Richtung der Behandlungsserien von 180° C links, 160°C und 200°C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern

5.2.1.2 Sorptionsverhalten und Quellung von Esche

Wie aus Diagramm 32 hervorgeht, bewirkt die Wärmebehandlung bei 160° C, 180° C und 200° C eine Herabsetzung des Sorptionsvermögens von Esche im gesamten hygroskopischen Bereich gegenüber dem unbehandelten Holz. Einen Unterschied zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern ist bei den thermisch behandelten Serien sowie bei der unbehandelten Serie sehr gering. Die Verminderung der Sorptionskapazität bei 6h/200°C, 12h/200°C und 24h/200°C unterscheidet sich nur unwesentlich. Die Gleichgewichtsfeuchte der Serie 6h/200°C beträgt bei der ersten Klimastufe (20°C/35% r.L.) 62 % und bei der letzten Klimastufe (20°C/93% r.L.) 60 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Gleichgewichtsfeuchten der Serien 24h/160°C und 24h/180°C betragen bei der ersten Klimastufe 68 % bzw. 52 % und bei der letzten Klimastufe 82 % bzw. 66 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Werte des Sorptionsverhaltens von Esche sind in Tabelle A-20 des Anhanges aufgeführt.

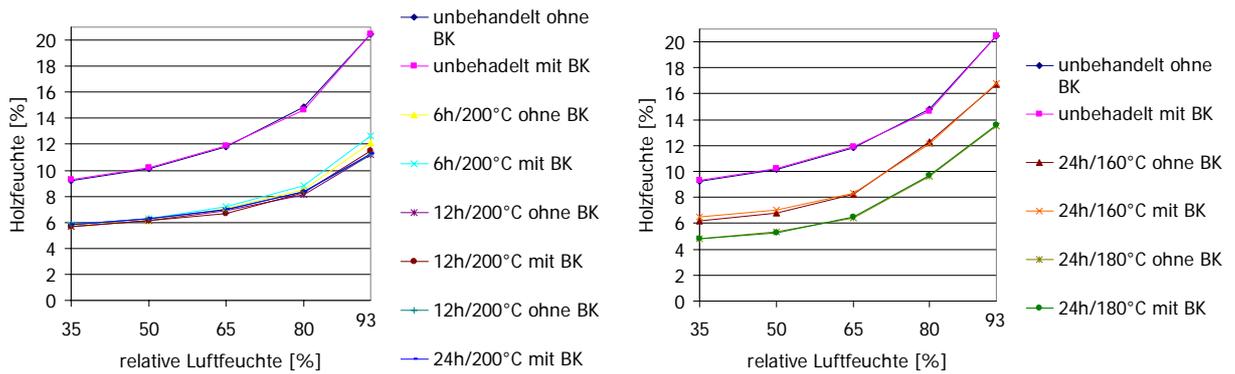


Diagramm 32: Sorptionsisotherme von Esche der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern

Es zeigt sich deutlich, dass die unbehandelten Proben sowohl in radialer (Diagramm 33) als auch in tangentialer (Diagramm 34) Richtung stärker quellen als die thermisch behandelten Proben. Der Unterschied des Quellverhaltens zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern im unbehandelten Zustand findet durch die thermische Behandlung eine Minderung. Im Bereich der hohen Luftfeuchtigkeiten (80 und 93 % r.L.) weisen die Behandlungsserien bei 200° C die kleineren Quellwerte auf als die Serien 24h/180° C und 24h/160° C. Im Bereich der niedrigen Luftfeuchtigkeiten (35 und 50 % r.L.) weisen alle Behandlungsserien keine grossen Abweichungen untereinander auf. Bei den Serien von 200° C beträgt im Durchschnitt die Quellung bei der ersten Klimastufe 63 % in radialer und 93 % in tangentialer und bei der letzten Klimastufe 58 % in radialer und 58 % in tangentialer Richtung der Werte der unbehandelten Serie. Bei der Serie 24h/180° C beträgt die Quellung bei der ersten Klimastufe in radialer Richtung 57 % und in tangentialer Richtung 70 % der Werte der unbehandelten Serie. Bei der letzten Klimastufe beträgt bei der Serie 24h/180° C die Quellung in radialer Richtung 70 % und in tangentialer Richtung 65 % der Werte der unbehandelten Serie. Die Werte der Quellung von Esche sind in Tabelle A-21 des Anhanges aufgeführt.

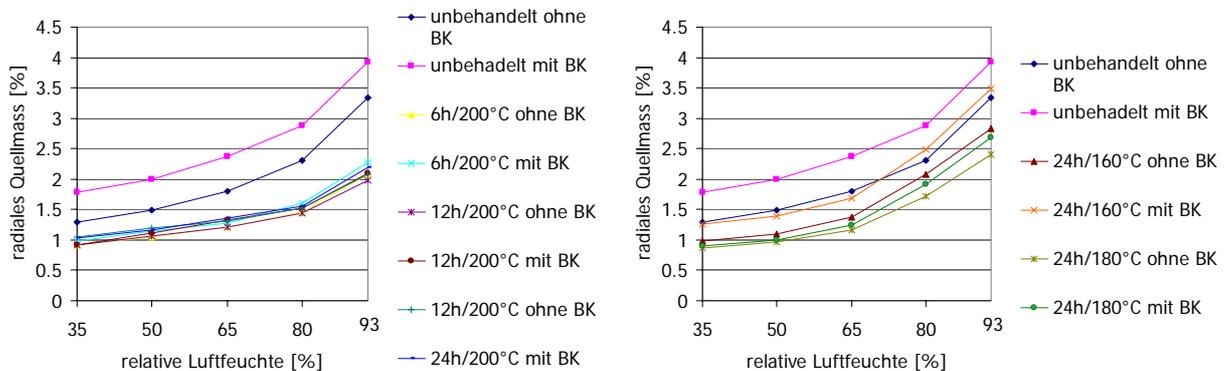


Diagramm 33: Quellmass von Esche in radialer Richtung der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern

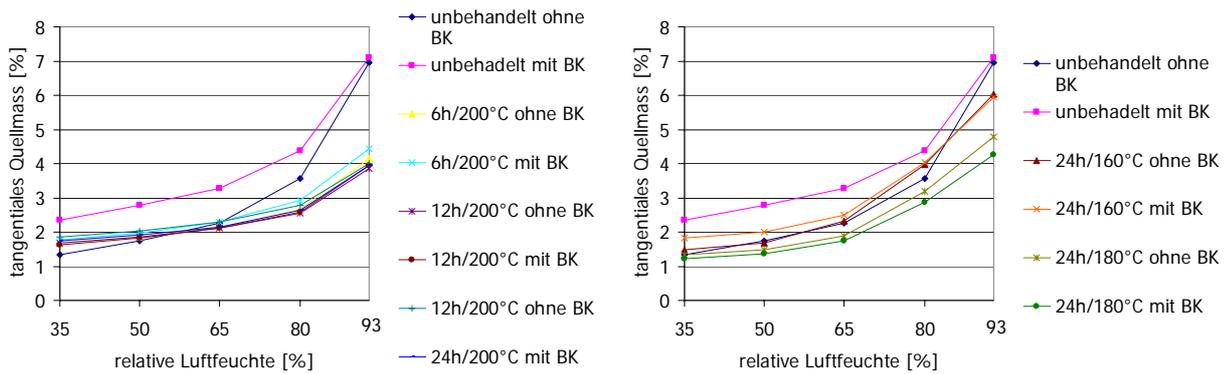


Diagramm 34: Quellmass von Esche in tangentialer Richtung der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern

5.2.1.3 Diskussion

Die Abnahme der Gleichgewichtsfeuchte basiert in erster Linie auf der Umwandlung der Holzbestandteile und der daraus resultierenden Abnahme der sorptiven Stellen. Das betrifft vor allem die Zellulose und die besonders temperaturanfälligen Hemizellulosen, die in grösstem Masse für die Adsorption der Wassermoleküle verantwortlich sind. Die vielen OH-Gruppen dieser Bestandteile werden zu einem grossen Teil durch die thermische Behandlung umgewandelt und verlieren so ihre Funktion als Sorptionsstellen. Die Erklärung für dieses Phänomen geben Popper et al [74]. Mit der erhöhten Temperatur kommen die Molekülketten der amorphen Zellulose durch die brownischen Molekularbewegung einander immer näher bis zwischen den freien OH-Gruppen halbchemische oder chemische Bindungen entstehen. Die so gebildeten Wasserstoffbrücken lassen die vorher amorphen Teile in kristalline übergehen, die sorptiven Stellen werden dadurch reduziert.

5.2.2 Masseänderung durch die thermische Behandlung

5.2.2.1 Änderung der Buchenholzmasse

Die Abhängigkeit der Masseänderung auf die verschiedenen Behandlungsserien ist deutlich in Diagramm 35 zu sehen. Mit zunehmender Behandlungstemperatur und Behandlungszeit steigt der Masseverlust. So ist der Masseverlust durch die Wärmebehandlung bei der Serie 6h/200°C ca. um 100 % grösser als die Serie 24h/180°C. Der Masseverlust der Serien bei 160° C ist bei etwa einem Prozent sehr klein. Zwei bis vier mal höhere Werte sind bei den Serien bei 180° C zu finden. Auffallend ist der höhere Masseverlust der Buche ohne Rotkern im Vergleich zur Buche mit Rotkern. Die Werte für den Masseverlust sind in Tabelle A-22 und Tabelle A-23 des Anhanges aufgeführt.

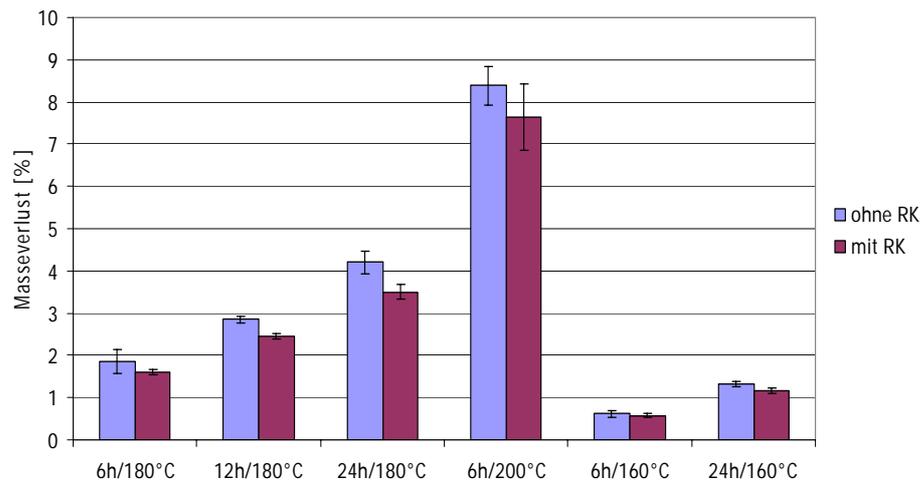


Diagramm 35: Masseverlust von Buche bezogen auf die Darrmasse vor der Behandlung. RK = Rotkern

5.2.2.2 Änderung der Eschenholzmasse

Die Masseänderung hängt stark von der Behandlungstemperatur und Behandlungsdauer ab. Mit zunehmender Behandlungstemperatur und Behandlungsdauer steigt der Masseverlust. So ist der Masseverlust der Serie 24h/200°C etwa doppelt so gross wie bei der Serie 6h/200°C. Auffallend ist der höhere Masseverlust der Esche ohne Braunkern im Vergleich zur Esche mit Braunkern. Die Werte für den Masseverlust sind in Tabelle A-24 und Tabelle A-25 des Anhangs aufgeführt.

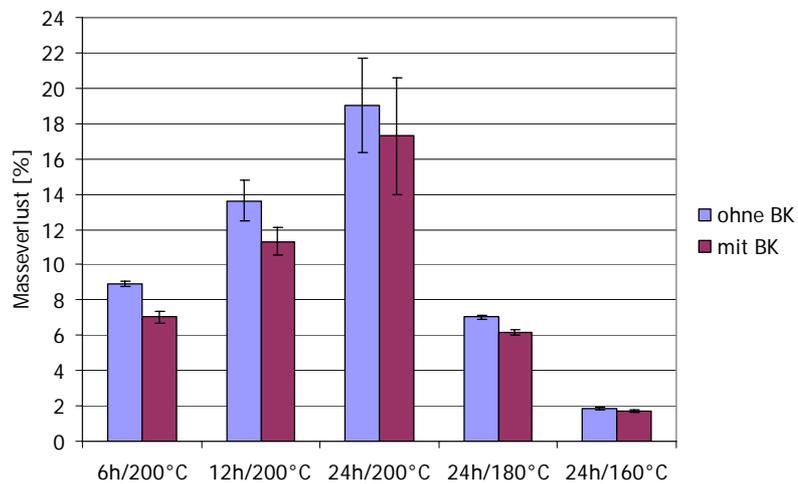


Diagramm 36: Masseverlust von Esche bezogen auf die Darrmasse vor der Behandlung. BK = Braunkern

5.2.2.3 Diskussion

Der beobachtete Masseverlust infolge der thermischen Behandlung lässt sich auf den thermisch bedingten Abbau einiger Holzbestandteile zurückführen. Bei steigender Temperatur im Probenkörper kommt es nacheinander zum Abbau bzw. zur Umwandlung der Holzpolyosen, der Zellulose und des Lignins. [15] [61]

5.2.3 Festigkeitseigenschaften

5.2.3.1 Härte von Buche

Tabelle 18: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern vor der Härteprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern

Probenanzahl: 10 Anzahl Messungen: 10 Serie	Rohdichte [g/cm ³]		Holzfeuchte [%]	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
6h / 160°C, ohne RK	0.67	0.03	11.4	0.2
6h / 160°C, mit RK	0.73	0.02	11.5	0.3
6h / 200°C, ohne RK	0.61	0.04	6.0	0.1
6h / 200°C, mit RK	0.71	0.02	6.2	0.4
6h / 180°C, ohne RK	0.65	0.02	9.2	0.1
6h / 180°C, mit RK	0.73	0.03	9.3	0.1
12h / 180°C, ohne RK	0.65	0.04	8.2	0.1
12h / 180°C, mit RK	0.72	0.03	8.3	0.1
24h / 180°C, ohne RK	0.62	0.03	7.5	0.1
24 h / 180°C, mit RK	0.71	0.02	7.5	0.1
unbehandelt, ohne RK	0.64	0.01	12.6	0.2
unbehandelt, mit RK	0.74	0.02	12.7	0.1

Aus Diagramm 37 lässt sich eine Zunahme der Härte in allen drei anatomischen Wuchsrichtungen bis und mit der Serie 12h/180°C feststellen. Die Serien 24h/180°C sowie die Serie 6h/200°C aus Diagramm 38 weisen zwar eine höhere Härte in Längsrichtung auf, jedoch nimmt die Härte in radialer und tangentialer Richtung leicht ab, liegen aber immer noch auf dem Niveau des unbehandelten Zustandes. Die Zunahme in radialer und tangentialer Richtung bis und mit der Serie 12h/180°C erfolgt nur in geringem Masse. Am deutlichsten steigt die Härte durch die thermische Behandlung in Längsrichtung. Der Mittelwert der Härte in Längsrichtung zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern ist bei der Serie 24h/180°C um 5% höher als bei der unbehandelten Serie. Die Werte für die Brinellhärte sind in Tabelle A-26 und Tabelle A-27 des Anhanges aufgeführt.

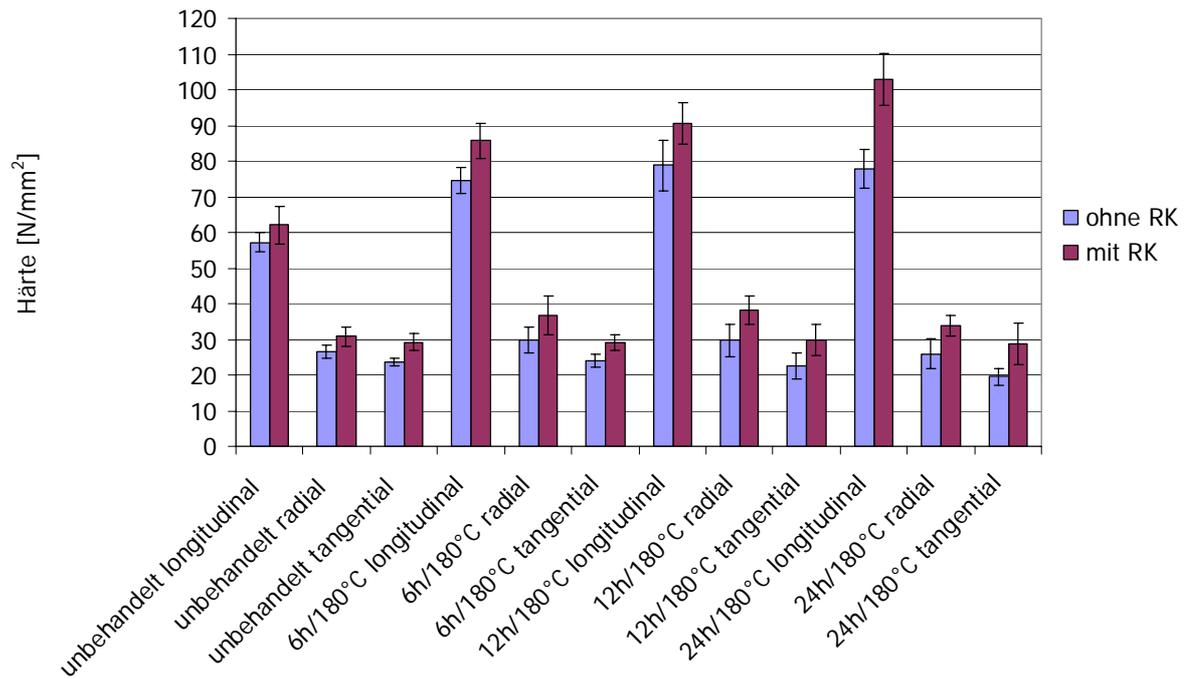


Diagramm 37: Härte von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern

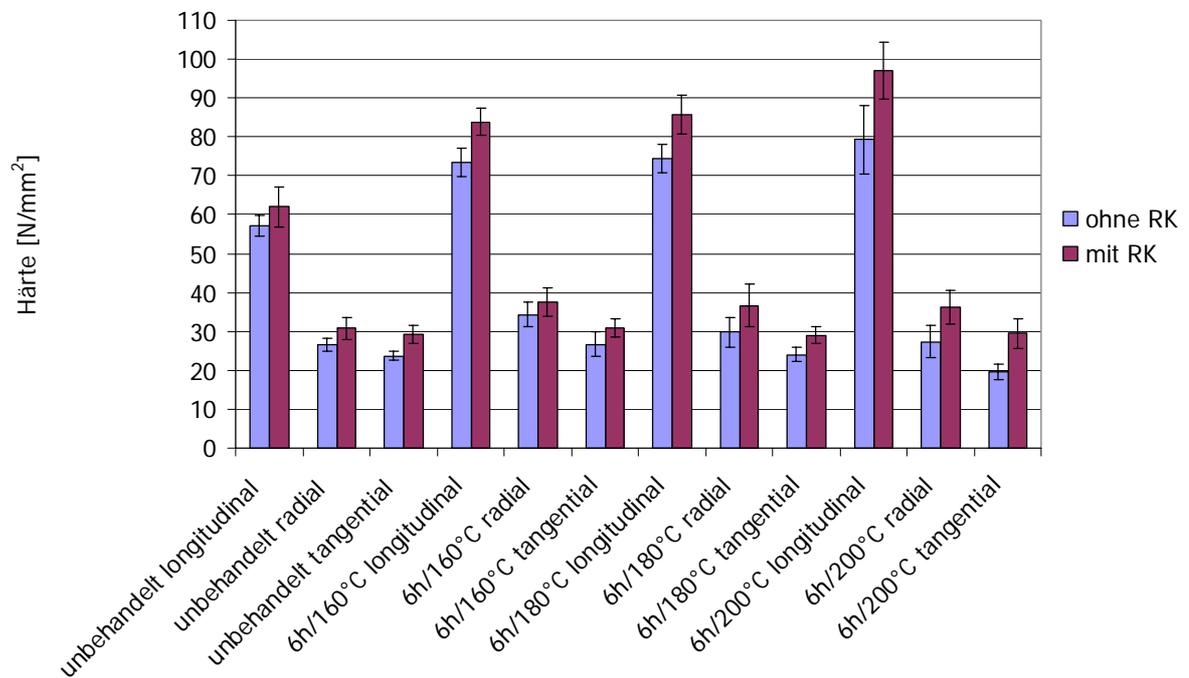


Diagramm 38: Härte von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern

Diagramm 39 zeigt den Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte (berechnet unter Verwendung der Mittelwerte der Rohdichte und Härte aus Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern jeder Serie). Die Korrelation der Härte der einzelnen Serien mit der Dichte ist in radialer Richtung relativ gering.

Die Härte in tangentialer Richtung weist dagegen eine höhere Dichteabhängigkeit auf. Wie erwartet steigt mit zunehmender Rohdichte die Brinellhärte an.

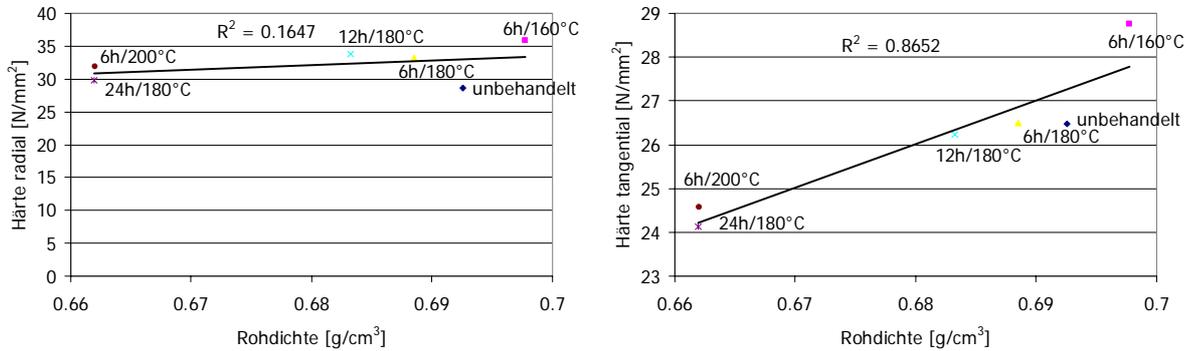


Diagramm 39: Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte der untersuchten Serien von Buche. Links Härte in radialer Richtung, rechts Härte in tangentialer Richtung. R² = Bestimmtheitsmass

5.2.3.2 Härte von Esche

Tabelle 19: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normklima von Esche mit Braunkern und Esche ohne Braunkern vor der Härteprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern

Probenanzahl: 10 Anzahl Messungen: 10	Rohdichte [g/cm³]		Holzfeuchte [%]	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
24h / 160°C, ohne BK	0.64	0.01	8.3	0.05
24h / 160°C, mit BK	0.64	0.01	8.3	0.06
24h / 180°C, ohne BK	0.61	0.03	6.4	0.07
24h / 180°C, mit BK	0.62	0.01	6.5	0.04
24h / 200°C, ohne BK	0.54	0.03	7.0	0.06
24h / 200°C, mit BK	0.59	0.01	7.0	0.07
12h / 200°C, ohne BK	0.56	0.01	6.9	0.07
12h / 200°C, mit BK	0.51	0.02	6.7	0.04
6h / 200°C, ohne BK	0.56	0.01	7.0	0.08
6h / 200°C, mit BK	0.60	0.01	7.2	0.09
unbehandelt, ohne BK	0.62	0.01	11.8	0.04
unbehandelt, mit BK	0.65	0.01	11.9	0.04

Die Härte nimmt bis zu einem gewissen Punkt der thermischen Behandlung zu. Bei den Serien 24h/160°C und 24h/180° (Diagramm 41) steigt die Härte gegenüber den unbehandelten Proben in allen drei anatomischen Wuchsrichtungen leicht an. Am deutlichsten ist die Härtezunahme in Längsrichtung. Die höchsten Werte in Längsrichtung sind bei der Serie 24h/180°C zu beobachten. In radialer und tangentialer Richtung findet man bei der Serie 24h/160°C ein Maximum. Die Werte sind dort um 29 % in radialer Richtung und um 5 % in tangentialer Richtung höher als bei der unbehandelten Serie. Erst bei den Behandlungsserien mit 200° C ist ein Rückgang der Härte zu verzeichnen (Diagramm 40), nach 6 h in radialer und tangentialer Richtung nach 12 h Behandlungsdauer auch in longitudinaler Richtung. Die Werte für die Brinellhärte sind in Tabelle A-28 und Tabelle A-29 des Anhanges aufgeführt.

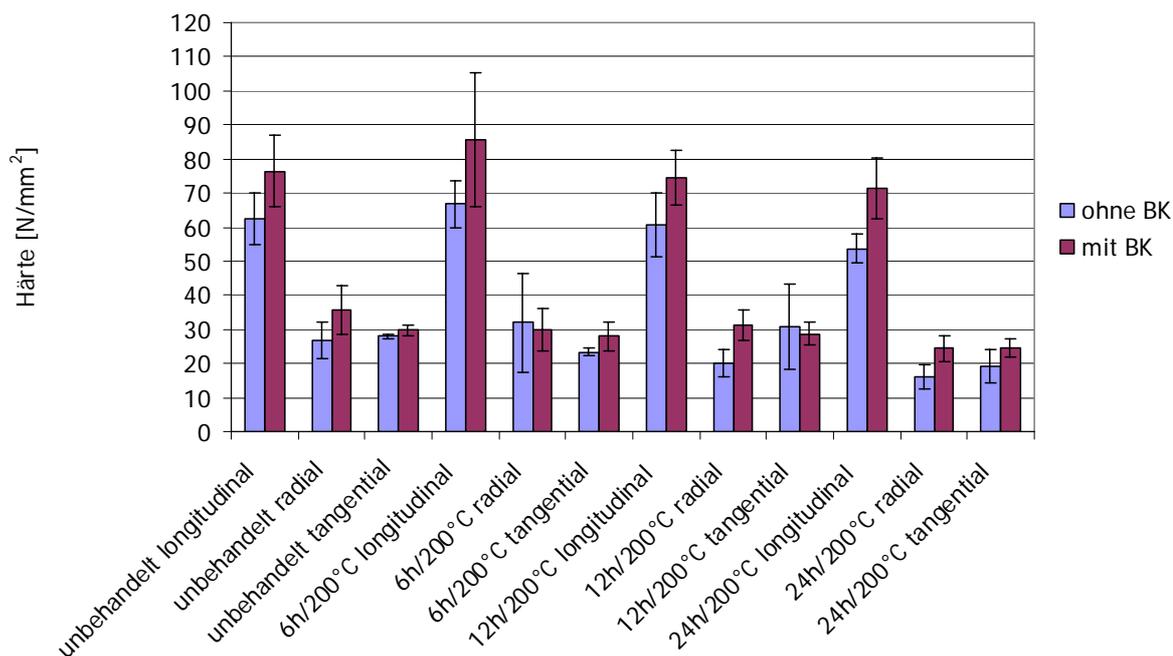


Diagramm 40: Härte von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern

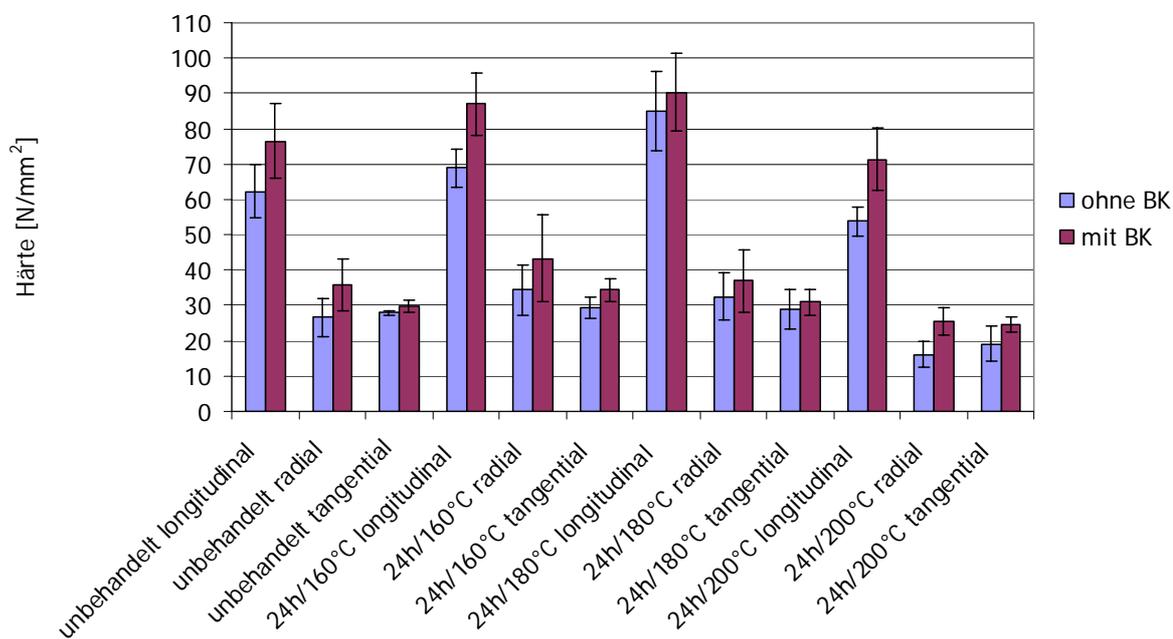


Diagramm 41: Härte von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur bei 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern

Diagramm 42 zeigt den Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte (berechnet unter Verwendung der Mittelwerte der Rohdichte und Härte aus Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern jeder Serie). Die Korrelation der Härte der einzelnen Serien mit der Dichte ist in tangentialer Richtung relativ gering. Die Härte in radialer Richtung weist dagegen eine höhere Dichteabhängigkeit auf. Wie erwartet steigt mit zunehmender Rohdichte die Brinellhärte an.

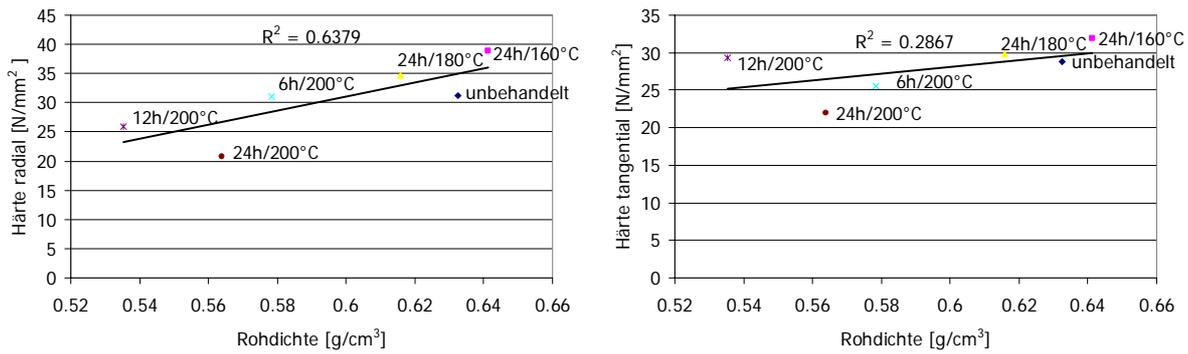


Diagramm 42: Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte der untersuchten Serien von Esche. Links Härte in radialer Richtung, rechts Härte in tangentialer Richtung. R² = Bestimmtheitsmass

5.2.3.3 Biegefestigkeit von Buche

Tabelle 20: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern vor der Biegefestigkeitsprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern

Probenanzahl: 10 Anzahl Messungen: 10 Serie	Rohdichte [g/cm³]		Holzfeuchte [%]	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
6h / 160°C, ohne RK	0.65	0.01	11.4	0.2
6h / 160°C, mit RK	0.74	0.01	11.5	0.3
6h / 200°C, ohne RK	0.64	0.03	6.0	0.1
6h / 200°C, mit RK	0.68	0.02	6.2	0.4
6h / 180°C, ohne RK	0.67	0.03	9.2	0.1
6h / 180°C, mit RK	0.70	0.03	9.3	0.1
12h / 180°C, ohne RK	0.67	0.04	8.2	0.1
12h / 180°C, mit RK	0.72	0.02	8.3	0.1
24h / 180°C, ohne RK	0.63	0.02	7.5	0.1
24 h / 180°C, mit RK	0.70	0.03	7.5	0.1
unbehandelt, ohne RK	0.68	0.03	12.6	0.2
unbehandelt, mit RK	0.72	0.02	12.7	0.1

Ein deutlicher anstieg der Biegefestigkeit gegenüber unbehandeltem Holz ist nur bei der Serie 6h/160°C zu verzeichnen (Diagramm 43 rechts). Ansonsten liegen die Werte der Serie 6h/180°C etwa auf dem gleichen Niveau wie die unbehandelte Serie. Ein geringer Rückgang der Biegefestigkeit ist bei der Serie 12h/180°C mit 4 % zu verzeichnen (Diagramm 43 links). Ein deutlicher Rückgang der Biegefestigkeit ist bei den Serien 24h/180°C und 6h/200°C mit je nahezu 22 % gegenüber unbehandeltem Holz zu beobachten. Das Verhalten von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern zeigt keine eindeutige Tendenz auf. Jedoch sind die Werte von Buche mit Rotkern vermehrt höher als von Buche ohne Rotkern. Die Werte für die Biegefestigkeit und den Biegeelastizitätsmodul sind in Tabelle A-30 und Tabelle A-31 des Anhanges aufgeführt.

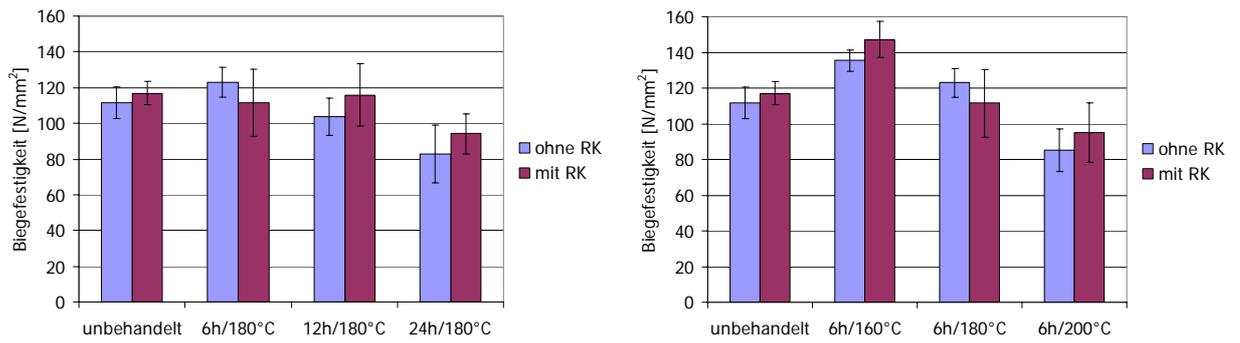


Diagramm 43: Biegefestigkeit von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern

Der Biegeelastizitätsmodul steigt bei allen Serien gegenüber der unbehandelten Serie um den gleichen Betrag an (siehe Diagramm 44). Im Durchschnitt beträgt die Erhöhung 8 % gegenüber der unbehandelten Serie. Die Werte von Buche mit Rotkern weisen bei allen Serien die höheren E-Module auf.

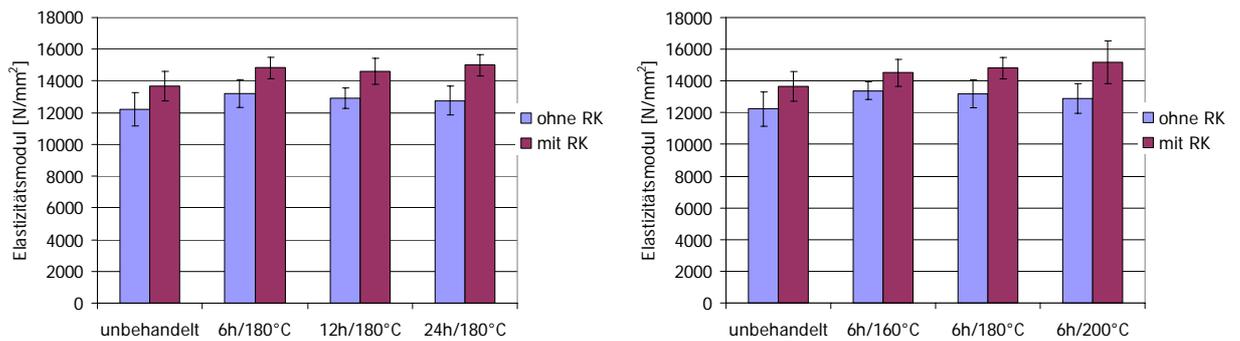


Diagramm 44: Elastizitätsmodul von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern

5.2.3.4 Biegefestigkeit von Esche

Tabelle 21: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normklima von Esche mit Braunkern und Esche ohne Braunkern vor der Biegefestigkeitsprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern

Probenanzahl: 10 Anzahl Messungen: 10 Serie	Rohdichte [g/cm ³]		Holzfeuchte [%]	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s
24h / 160°C, ohne BK	0.59	0.02	8.3	0.05
24h / 160°C, mit BK	0.63	0.02	8.3	0.06
24h / 180°C, ohne BK	0.59	0.02	6.4	0.07
24h / 180°C, mit BK	0.61	0.01	6.5	0.04
24h / 200°C, ohne BK	0.54	0.02	7.0	0.06
24h / 200°C, mit BK	0.58	0.02	7.0	0.12
12h / 200°C, ohne BK	0.54	0.03	6.9	0.07
12h / 200°C, mit BK	0.60	0.01	6.7	0.04
6h / 200°C, ohne BK	0.57	0.02	7.0	0.08
6h / 200°C, mit BK	0.62	0.02	7.2	0.08
unbehandelt, ohne BK	0.63	0.02	11.8	0.04
unbehandelt, mit BK	0.65	0.02	11.9	0.04

Durch die thermische Behandlung kommt es bei allen Serien zu einer Abnahme der Biegefestigkeit (vgl. Diagramm 45). Am stärksten betroffen sind die Behandlungen mit 200° C. Nach 24 h Behandlungszeit macht die Biegefestigkeit bei 200° C bezogen auf die unbehandelten Proben noch 42 % aus. Weniger stark ist die Abnahme der Biegefestigkeit der Serien 24h/160°C und 24h/180°C. Dort geht die Biegefestigkeit im Mittel um 5 % bzw. 22 % zurück. Was sich deutlich bei allen Serien abzeichnet, ist die höhere Biegefestigkeit der Buche mit Rotkern gegenüber der Buche ohne Rotkern. Die Werte für die Biegefestigkeit und den Biegeelastizitätsmodul sind in Tabelle A-32 und Tabelle A-33 des Anhanges aufgeführt.

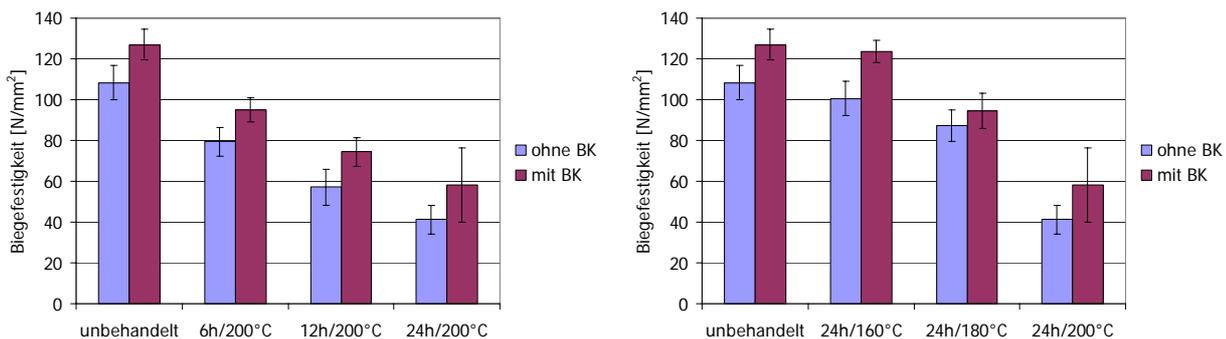


Diagramm 45: Biegefestigkeit von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern

Der Biegeelastizitätsmodul der Serien bei 200° C weist zunächst einen leichten Anstieg der Werte auf (siehe Diagramm 46). Danach sinkt er mit zunehmender Behandlungsdauer und unterschreitet nach 24 h die Werte der unbehandelten Serie. Die Serie 24h/160°C steigt um 2 % und die Serie 24h/180°C um 3 % gegenüber der unbehandelten Serie an.

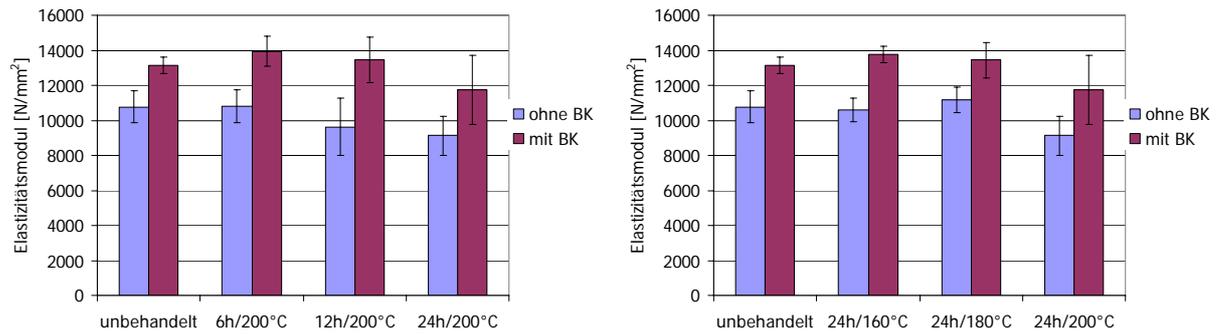


Diagramm 46: Elastizitätsmodul von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern

5.2.3.5 Diskussion

Der Anstieg der mechanischen Eigenschaften bis zu einem gewissen Punkt der thermischen Behandlung ist trotz Masseverlust auf die geringere Ausgleichsfeuchte zurückzuführen. Eine höhere Rohdichte trotz Masseverlust ist auf eine Verdichtung der Zellwandstruktur durch die thermische Behandlung zurückzuführen.

Die Abnahme der mechanischen Eigenschaften ab einem gewissen Punkt der thermischen Behandlung ist mit dem thermischen Abbau der Holzsubstanzen zu begründen. Sind die Auswirkungen des Massenabbaus grösser als die Auswirkungen der verminderten Holzausgleichsfeuchte, kommt es zu einem Rückgang der Brinellhärte und der Biegefestigkeit.

Die leichte Zunahme des Biegeelastizitätsmodules ist mit der Zunahme der Sprödigkeit zu verbinden. Vor allem bei Buche ist diese Erscheinung zu beobachten.

5.3 Rasterelektronenmikroskop (REM)

5.3.1 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Buche

Auf den REM-Aufnahmen sind zum Teil Abweichungen der Holzstruktur zwischen den unbehandelten Proben und thermisch behandelten Proben zu erkennen.

In Abbildung 31 sieht man Gefäße im Frühholzbereich, eingebettet in das Fasergrundgewebe. Im unbehandelten Zustand sind keinerlei auffällige Strukturänderungen des Zellgewebes festzustellen. Die leicht ausgefranzten Zellwände sind auf die Herstellung der REM-Proben zurückzuführen.

In Abbildung 32 (thermisch behandelt 6h/200°C) rechts erkennt man kurze Risse, die den Markstrahlen entlang gehen. Tendenziell beginnen die Risse an der Jahrringgrenze. Der Riss entsteht im Bereich der Grenze zwischen Zellverbund und Markstrahl. Im Bild links ist ein solcher Riss beim rechten Markstrahl zu sehen.

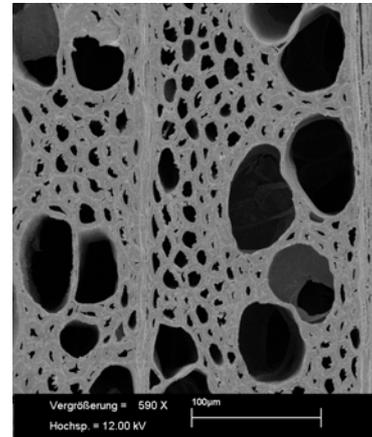
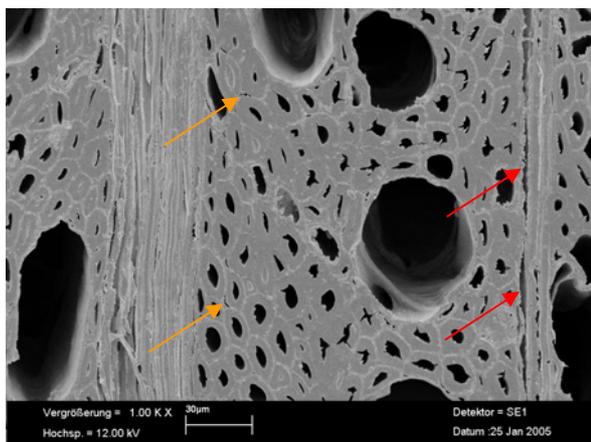
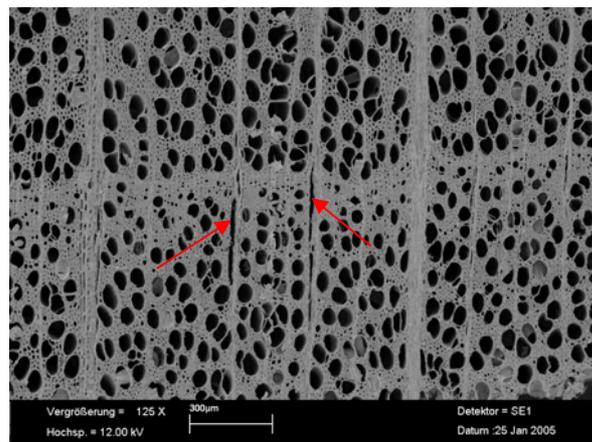


Abbildung 31: REM-Aufnahme von unbehandelter Buche im Querschnitt



A



B

Abbildung 32: A und B: REM-Aufnahmen von thermisch behandelter Buche mit Rotkern (6h/200°C), Querschnitt. Rote Pfeile markieren die Risse, gelbe Pfeile eine Ablösung der Zellen untereinander im Bereich der Mittellamelle

5.3.2 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Esche

Auch hier sind zum Teil Veränderungen der Holzstruktur zwischen den unbehandelten Proben und thermisch behandelten Proben zu erkennen.

In Abbildung 33 sieht man im Querschnitt das Zellgefüge von unbehandelter Esche. In der Bildmitte erkennt man zwei Gefäße umgeben von Parenchymzellen.

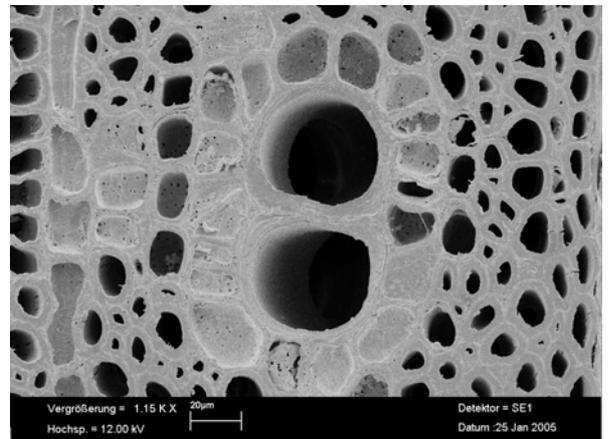
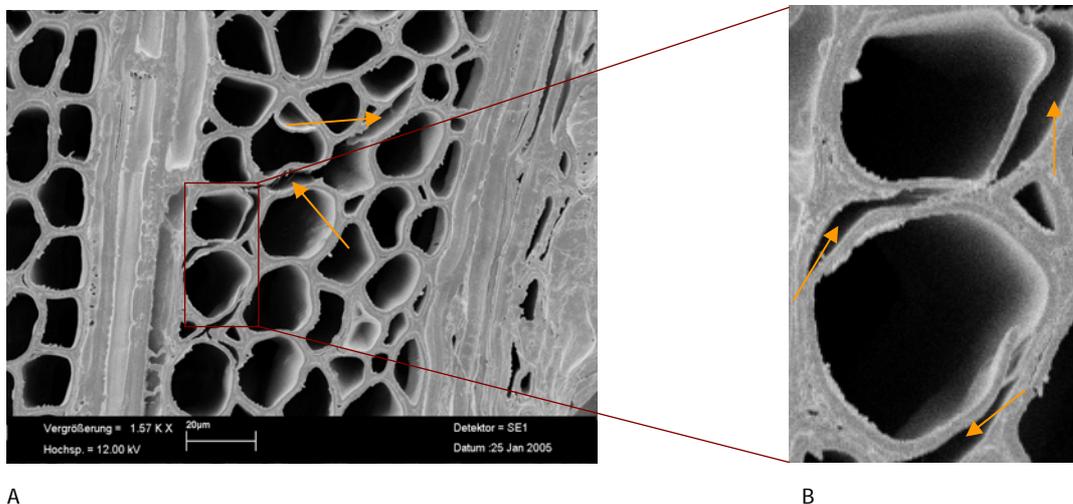


Abbildung 33: REM-Aufnahme von unbehandelter Esche ohne Braunkern, Querschnitt

In Abbildung 34 (thermisch behandelt 24h/180°C) ist eine Ablösung der inneren Zellwandschichten im Bereich der Sekundärwand zu erkennen (siehe Abbildung 34 B). An manchen Stellen ist auch eine Ablösung der Zellen untereinander auszumachen. Dabei entstehen Zwischenräume im Bereich der Grenze Mittellamelle-Primärwand oder zwischen Mittelschicht (Mittellamelle + Primärwand) und Sekundärwand.



A

B

Abbildung 34: A und B: REM-Aufnahme von thermisch behandelter Esche ohne Braunkern (24h/180°C), Querschnitt. B: Vergrößerung aus Bild A. Die gelben Pfeile markieren Ablösungen in der Zellwand sowie zwischen den Zellen.

5.3.3 Diskussion

Die auf den Aufnahmen sichtbaren Risse und Ablösungen in der Zellwand sind wahrscheinlich nur bedingt direkte Auswirkungen der thermischen Behandlung. Sie sind eher ein Indiz für die zunehmende Sprödigkeit der modifizierten Proben. Daher könnten diese Fehlerstellen auf eine erschwerte REM-Probenherstellung aufgrund dieser veränderten Eigenschaften zurückgeführt werden.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die praktische Anwendung der Ergebnisse

6.1 Farbegalisation und Farbstabilität

Der deutliche Farbunterschied von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern sowie von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern, wird durch die thermische Behandlung weitgehend reduziert.

Eine Farbegalisation bei der Buche hat bei den untersuchten Behandlungstemperaturen von 160° C und 180° C deutlich stattgefunden. Die Farbegalisation unterscheidet sich bei beiden Temperaturserien einerseits durch die gemessenen Farb- und Helligkeitsdifferenzwerte und andererseits durch den Egalisierungsverlauf in Abhängigkeit der Behandlungsdauer nur gering. Betrachtet man die Dunkelfärbung, so erreicht man mit einer Behandlungstemperatur von 180° C die deutlich grössere Verfärbung als bei 160° C. Die Dunkelfärbung bei 160° C bringt kein zufrieden stellendes Ergebnis mit sich. Nach 24 Stunden Behandlungszeit ist die Ausgangsfarbe kaum verändert. Hingegen nach 12 bis 24 Stunden Behandlung wird bei 180° C ein helles bis dunkles Braun erreicht.

Jedoch bringt das Entstehen von hellen Streifen bei thermisch behandelte Buche mit Rotkern einen ernstzunehmenden Effekt mit sich. Störend wirkt er, wenn eine schlichte homogene Oberfläche angestrebt wird. Wenn eine gewisse Lebhaftigkeit und Spannung das Erscheinungsbild prägen soll, wirkt sich dieser Effekt positiv aus. Daher stellt die erreichte Farbegalisation und Dunkelfärbung bei 180° C unter bestimmten Einsatzbedingungen nur eine beschränkt qualitätssteigernde Massnahme dar. Weitere Untersuchungen müssen Aufschluss über diese lokale Verfärbung und den beteiligten Holzinhaltstoffe bringen.

Auch bei der Esche ist eine Farbegalisation bei allen untersuchten Temperaturstufen erfolgt. Hier, im Gegensatz zu Buche sind nach der Behandlung keine Unregelmässigkeiten mehr festzustellen. Bei 160° C ist die Farbegalisation zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern zwar visuell fast vollständig erfolgt, jedoch ist auch hier die Dunkelfärbung als sehr gering und daher als unzureichend einzustufen. Bei 180° C ist nach 12 Stunden und bei 200° C ist bereits nach 6 Stunden Behandlungszeit visuell kein Unterschied mehr feststellbar. Bei 180° C wird nach 12 Stunden Behandlungszeit ein rötliches Braun erreicht und geht nach weiteren 12 Stunden in Richtung Dunkelbraun. Somit ergibt sich eine homogene Dunkelfärbung zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern die eine qualitätssteigernde Verbesserung mit sich bringt. Die Behandlung bei 200° C erwies sich bei der Farbgebung als sehr stark. Die Farbe weist bereits nach 6 Stunden ein kräftiges schwarzbraun auf, das sich im weiteren Verlauf der Behandlung visuell kaum mehr ändert. Bei Bedarf von sehr dunklen Farben könnte diese Behandlung Anwendung finden.

Thermoholz bringt gegenüber der UV-Bestrahlung keine farbstabilisierende Eigenschaft mit sich. Versiegelt man thermisch behandeltes Holz mit einem Acryllack, so lässt sich eine Verbesserung der Farbstabilität gegenüber unbehandeltem, versiegeltem Holz erzielen. Hingegen erwies sich Wasserlack nicht als UV-stabile Beschichtung auf Thermoholz. Der derzeit aktuelle Trend zu ökologischen Produkten, lässt eine Oberflächenbehandlung mit Naturölen und -wachsen in den Vordergrund rücken. Daher ist es wichtig thermisch behandeltes Holz in Zukunft auch in Kombination mit solchen Produkten zu prüfen.

6.2 Physikalische und Mechanische Eigenschaften

Durch Betrachten des Masseverlustes kann man den Grad der thermischen Behandlung abschätzen. Wie erwartet nimmt mit zunehmender Temperatur und Behandlungszeit der Masseverlust zu.

Die Brinellhärte stieg teilweise an. Die Grenze zwischen Zunahme und Abnahme der mechanischen Eigenschaften liegt bei der Brinellhärte schnittrichtungsabhängig bei verschiedenen Temperatur- und Zeitstufen. Betrachtet man die radiale und tangential Belastungsrichtung, so lässt sich bei Buche ein Maximum der Härte bei 180° C nach 12 Stunden Behandlungszeit erkennen. Bei weiterer Erhöhung der Behandlungszeit auf 24 Stunden zeichnet sich der Rückgang der Härte und somit das Überschreiten der Grenze ab. Die Grenze bei Esche liegt im selben Bereich. Die Behandlung bei 200° C erwies sich als zu stark.

Die Grenze der Biegefestigkeitszunahme durch die thermische Behandlung liegt bei Buche bei 160° C nach 6 Stunden Behandlungszeit. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur auf 180° C sinkt die Biegefestigkeit. Bei Esche kam es bei allen Behandlungsstufen zu keiner Erhöhung der Biegefestigkeit. Vor allem die Serien bei 200° C waren begleitet von hohen Festigkeitsverlusten. Bei der Vergütung mit 180° C kommt es nach wie vor zur Reduzierung der Biegefestigkeit, jedoch hält es sich in Grenzen. Der teilweise Anstieg der Härte und der Biegefestigkeit ist mit der reduzierten Holzfeuchte in Verbindung zu bringen.

Das verminderte Schwind- und Quellverhalten gilt als viel genannter positiver Aspekt der thermischen Behandlung. Auch die vorliegenden Untersuchungen belegen das. Bei Anstieg der Behandlungstemperatur von 180 auf 200° C ist bei beiden Holzarten die Verbesserung des Sorptionverhaltens nur sehr gering. Aus energietechnischen Gründen wäre daher eine Sorptionsvergütung bei 180° C ausreichend.

6.3 Relevante Aspekte für industrielle Anwendungsbereiche

Die Eindämmung der Farbkernbildung bei Buche und Esche beginnt als präventive Massnahme nach wie vor im Wald. Die thermische Behandlung nimmt hier die Stellung der kurativen Massnahme ein und führt bei Buche nicht zu einem völlig farbkernfreien Erscheinungsbild. Der Farbkerncharakter bleibt durch streifenartige Farbunterschiede, die mehr oder weniger ausgeprägt sein können, erhalten.

Für den Parketteinsatz lassen sich durch die thermische Vergütung in Luftgasatmosphäre mit 180° C und 24 Stunden Behandlungszeit bei Buche und bei Esche im Hinblick auf die Farbe, Quellung und Härte die besten Resultate erzielen. Die Holzfarbe gleicht nach der Behandlung einer dunkelbraun gebeizten Holzoberfläche und kommt in den Farbbereich von verschiedenen tropischen Hölzern. Eine Versiegelung von Thermoholz mit Acrylatlack bringt vor allem bei Innenräumen mit hoher UV-Belastung, wie z.B. hinter grossen Fensterflächen, eine Verbesserung der Farbstabilität gegenüber unbehandeltem, versiegeltem Holz mit sich. Die Quellung in radialer und tangentialer Richtung nimmt im Mittel über den untersuchten hygroskopischen Bereich (35 % bis 93 % relative Luftfeuchte bei 20° C) bei Buche gegenüber unbehandeltem Holz um 40 % ab. Bei Esche beträgt die Abnahme 35 %. Während die Härte bei Esche in radialer und tangentialer Richtung um 8 % zunimmt, ist bei der Buche die Härte nach der Behandlung gegenüber unbehandeltem Holz, mit einem Rückgang von 2 %, kaum verändert. Der Biegefestigkeitsrückgang von 22 % bei Buche und bei Esche, muss beim Einsatz im Parkettbereich, insbesondere bei Massivholzdielen, beachtet werden.

Einen weiteren Aufschluss über die Tauglichkeit von Thermoholz im Parkettbereich, vor allem bei der Herstellung von Mehrschichtparkett, müsste mit einer Untersuchung der Verleimbarkeit aufgezeigt werden. Die veränderte Holzgleichsfeuchte und die chemische Veränderung der Holzstruktur durch die thermische Behandlung könnten sich auf die Festigkeitseigenschaften der Leimfuge auswirken. Dazu wären Prüfungen mit Polyurethan- sowie Dispersionsklebstoffen, deren Festigkeit von der Holzfeuchte beeinflusst wird, durchzuführen.

Für die Übertragung der thermischen Behandlung in Luftgasatmosphäre aus dem Labormassstab in den industriellen Massstab müssen unter anderem folgende Punkte beachtet werden:

- Die thermische Behandlung von Holz führt neben dem Masseabbau auch zu einer Verringerung des Holzvolumens. Diesem Tatbestand muss bei den Dimensionen des Ausgangsmaterials Rechnung getragen werden, ähnlich wie das bei der technischen Trocknung der Fall ist.
- Die Pyrolysegase, die während dem Vergütungsprozess entstehen sowie das Holz, können sich bei Temperaturen von über 200° C während der Behandlung entzünden. Daher sind geeignete Massnahmen (Einbringen von Wasserdampf oder einer Schutzgasatmosphäre) zur Verhinderung der Endzündung der Gase bzw. des Holzes von grosser Bedeutung.
- Bei der Verarbeitung von thermisch behandeltem Holz ist die erhöhte Sprödigkeit zu berücksichtigen. Zerspanungsarbeiten müssen evt. im Gleichlauf, mit reduzierter Vorschubgeschwindigkeit oder mit angepassten Werkzeugen durchgeführt werden.
- Bis anhin wurde bei den meisten Thermoholzverfahren die Vergütung im Anschluss an eine technische Trocknung durchgeführt. Eine Kombination von Trocknung und thermischer Vergütung könnte eine wesentliche Herabsetzung der Behandlungszeiten (Trocknung und thermische Vergütung) zur Folge haben.

Um die gewonnenen Kenntnisse umzusetzen, müssen das Investitionsvolumen solcher Anlagen sowie die Herstellungskosten in Erfahrung gebracht werden. Es bestehen bereits Untersuchungen der ETH Zürich [54] welche Preise von verschiedenen europäischen Thermoholzherstellern und Händlern vergleichen. Ferner werden auch gleichwertige Produkte aus edlen, zum Teil auch tropischen Holzarten sowie druckimprägniertem Holz mit Thermoholz verglichen. Sollte die thermische Vergütung auch für kleinere und mittlere Unternehmen rentabel sein, könnte sich auch eine Perspektive für eine schweizerische Thermoholzproduktion eröffnen. In erster Linie gilt es die Sägereien über die Möglichkeiten der Thermoholzherstellung zu informieren aber auch Architekten und Bauherren müssen über den Baustoff Thermoholz in Kenntnis gesetzt werden. Branchenverbände, Fachzeitschriften sowie Umweltschutzorganisationen und nicht zuletzt auch die Forschung müssen ihre Aufgabe als Wissensvermittler wahrnehmen.

Verzeichnisse

Literatur

- [1] Ahola, P.; Jämsä, S.; Viitanen, H.; Viitaniemi, P. (2001): Mould and blue stain on heat treated wood. VTT Helsinki.
- [2] Anonymus (1984): Parkett: technische Informationen. Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. Düsseldorf.
- [3] Autorenkollektiv (1999): Formeln und Tafeln, Mathematik – Physik. Orell Füssli Verlag, Zürich.
- [4] Ayadi, N.; Lejeune, F.; Charrier, F.; Charrier, B.; Merlin, A. (2003): Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. Holz als Roh- und Werkstoff, 61, S. 221-226.
- [5] Bächle, F. (2004): Weathering resistance of oil-heat-treated timber. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik, Int. Bericht Nr. 19.
- [6] Bartlomé, O.; Oelhafen, M. (2004): Vergütung von Fichtenschindeln mittels Rauch. Projektarbeit Wintersemester 03/04. Hochschule für Architektur, Bau und Holz, Biel.
- [7] Bilddatenbank, Gruppe Holzphysik, Institut für Baustoffe, ETH Zürich 2005
- [8] boden wand decke: www.boden-wand-decke.de, 16.12.2004
- [9] Bosshard, H. H. (1953): Der braune Kern der Esche. Holz als Roh- und Werkstoff, 9, S. 349-353.
- [10] Bosshard, H. H. (1956): Zur Physiologie des Eschenbraunkernes. Institut für allgemeine Botanik ETH, Laboratorium für Holzforschung.
- [11] Bosshard, H. H. (1982): Holzkunde Band 1, Mikroskopie und Makroskopie des Holzes. 2. überarbeitete Auflage. Birkhäuser Verlag Basel-Boston-Stuttgart.
- [12] Bosshard, H. H. (1984): Holzkunde Band 2. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. überarbeitete Auflage. Birkhäuser Verlag Basel-Boston-Stuttgart.
- [13] Bosshard, H. H.; Hösli, J. P. (1975): Überprüfung der Tränkbarkeit von rotkernigem Buchenholz mit Steinkohlenteeröl: Tränkerfolg im Abhängigkeit der Thyllenhäufigkeit. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, S. 865-875.
- [14] Buchmüller, K. S. (1985): Holzkundliche Untersuchungen von Buchen verschiedener Regionen in Hinsicht auf die Imprägnierbarkeit. Dissertation Nr. 7938 ETH Zürich.
- [15] Burmester, A. (1970): Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit. Grundlagen und Vergütungsverfahren. BAM-Bericht Nr. 4. Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin.
- [16] Buro, A. (1954): Die Wirkung von Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 12, S. 297-304.
- [17] Deliiski, N (2003): A mathematical model and an optimal control of the wood steaming process in autoclaves. Faculty of Forest Industry, University of Forestry, 1756 Sofia, Bulgaria.
- [18] Dietrichs, H.H. (1964): Chemisch-physiologische Untersuchungen über die Splint-Kern-Umwandlung der Rotbuche (*Fagus sylvatica* Linn.). Bundesforschungsanstalt für Forst- u. Holzwirtschaft Reinbek bei Hamburg; Nr 58, Kommissionsverlag Buchhandlung Max Wiedebusch Hamburg.
- [19] DIN 11507 (2002)
- [20] DIN 1534 (2000)
- [21] DIN 280-1 (1970)
- [22] DIN 280-2 (1970)
- [23] DIN 280-3 (1970)
- [24] DIN 280-5 (1973)
- [25] DIN 5033 (1979)
- [26] DIN 52182 (1976)
- [27] DIN 52183 (1977)
- [28] DIN 52184 (1979)
- [29] DIN 52186 (1978)
- [30] Ewert, M. (2004): Thermoholz in der Anwendung, Eigenschaften und Möglichkeiten. Ingenieurholzbau, Karlsruher Tage 2004. Bruderverlag, Universität Karlsruhe.

- [31] Fengel, D.; Wegener, G. (1984): Wood-Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Walter de Gruyter, New York.
- [32] FinnWoodFloors Oy – Karelia: <http://www.kareliaparketti.com/>, 16.12.2004
- [33] Gieck, K.+R. (1995): Technische Formelsammlung. 30. deutsche Auflage. Gieck Verlag Germering.
- [34] Grossmann, C. M. (2002): Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing. Universität Freiburg, Institut für Forstpolitik, Arbeitsbereich Markt und Marketing.
- [35] Holzindustrie Schweiz: <http://www.holz-bois.ch/>, 11.11.04
- [36] Holzmarktkommission BUWAL Forstdirektion: <http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/>, 11.11.04
- [37] <http://www.balz-holz.ch/>, 16.11.2004
- [38] <http://www.cie.co.at/cie/>, 06.01.05
- [39] <http://www.fowi.ethz.ch>, 07.01.05
- [40] <http://www.holz-und-umwelt.de>, 09.07.04
- [41] <http://www.lebois.ch/>; Scierie du Brassus Richard Berney SA, 17.11.2004
- [42] <http://www.mafi.at/>, 17.11.2004
- [43] <http://www.menzholz.de/>, 16.11.2004
- [44] <http://www.mitteramskogler.at/>, 17.11.2004
- [45] <http://www.muehlboeck.co.at/>, 17.11.2004
- [46] <http://www.platowood.nl/>, 04.01.2005
- [47] <http://www.retifie.com>, 16.11.2004
- [48] <http://www.stellac.fi/>, 15.11.2004
- [49] <http://www.thermowood.fi/>, 15.11.2004
- [50] <http://www.vtt.fi>, 15.11.2004
- [51] Huber, B. (1956): Die Saftströme der Pflanzen. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- [52] Interessengemeinschaft der Schweizerischen Parkett-Industrie ISP: <http://www.parkettverband.ch/>, 10.12.2004
- [53] Junghans, K. (2003): Untersuchungen zu spezifischen Eigenschaftsänderungen bei der thermischen Vergütung von Fichtenholz. Diplomarbeit an der BA Sachsen, durchgeführt an der ETH Zürich, Professur Holzwissenschaften.
- [54] Junghans, K. (2005): Praxistauglichkeit thermisch behandelten Holzes. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik. Int. Bericht Nr. 27.
- [55] Kamdem, D. P.; Pizzi, A.; Jermannaud, A. (2002): Durability of heat-treated wood. Holz als Roh und Werkstoff, 60, S. 1-6.
- [56] Kamdem, D. P.; Pizzi, A.; Triboulot, M. C. (2000): Heat-treated timber: potentially toxic byproducts presence and extent of wood cell wall degradation. Holz als Roh und Werkstoff, 58, S. 253-257.
- [57] Kohler, M. (1999): Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen aus Teerölbehandelten Eisenbahnschwellen, EMPA Dübendorf.
- [58] Kollmann, F. (1941): Die Esche und ihr Holz. Verlag von Julius Springer, Berlin.
- [59] Kollmann, F. (1955): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, zweite Auflage, zweiter Band. Springer-Verlag, Berlin.
- [60] Kollmann, F.; Keylwerh, R.; Kübler, H. (1951): Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holz Trocknung. Holz als Roh und Werkstoff, 10, S 382-391.
- [61] Kollmann, F.; Schneider, A. (1964): Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200° C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes. Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.
- [62] König, E. (1962): Holz-Lexikon. Nachschlagewerk für die holzwirtschaftliche Praxis. Holz-Zentralblatt Verlags-GmbH, Stuttgart.

- [63] Kucera, L.; Gfeller B. (1994): Einheimische und Fremdländische Nutzhölzer, Merkmale und Eigenschaften der in der Schweiz gebräuchlichsten Holzarten. Professur Holzwissenschaften ETH Zürich, HSB Biel.
- [64] Kühne, H. (1954): Über die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des braunen Kernholzes der Esche. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, S. 733-745. ETH Zürich.
- [65] Mc Geer, M. (2001): Weathering Testing Guidebook. Atlas Electric Devices Company, Chicago
- [66] Militz, H. (2004): Referat an der ETH Zürich vom 13.12.2004. Entwicklungstendenzen bei der Holzmodifikation.
- [67] Molnár, S.; Nemeth, R.; Feher, S.; Tolvaj, L.; Papp, G.; Varga, F. (2001): Drevarsky Vyskum, 46, 21.
- [68] Niemz, P. (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.
- [69] Oelhafen, M. (2004): Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Holz. Bestandesaufnahme und Testung neuer Einsatzbereiche für schwer absetzbare Sortimenten. Literaturrecherche. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik, Int. Bericht Nr. 21.
- [70] Orth, H. (1971): Untersuchungen an Polymerholz. Staatliche Ingenieurschule Esslingen a. N.
- [71] Petersen, H. (1991): Grundlagen der deskriptiven und mathematischen Statistik, Band 1. ecomed verlagsgesellschaft mbH, Landsberg/Lech.
- [72] Pöhler, E.; Klingner, R.; Künniger, T. (2004): Rotkerniges Buchenholz – Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. Projektnr. 2002.17, EMPA Dübendorf.
- [73] Pöhler, E.; Seubert, H. (2001): Holzkunde II-Teil 2, Holzchemie. ETH Zürich, Departement Forstwissenschaften, Professur für Holzwissenschaften.
- [74] Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2004): Feuchteverformung des wärmebehandelten Holzes entlang der Sorptionsisotherme. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik, Int. Bericht Nr. 6.
- [75] Rieder, A. (1997): Der Farbkern der Buche, Wald und Holz 10/97, S. 55-58.
- [76] Riehl, T.; Welling, J.; Frühwald, A. (2002): Druckdämpfen von Schnittholz. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft und Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Universität Hamburg.
- [77] Sachs, L. (1984): Angewandte Statistik Anwendung statistischer Methoden, sechste Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [78] Sailer, M.; Rapp, A. O.; Leithoff, H.; Peek, R.-D. (2000): Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. Holz als Roh- und Werkstoff 58, S. 15-22
- [79] Saupp, U. (1992): Einfluss der Pigmente auf die Witterungsstabilität buntpigmentierter Lacke. Institut für Technische Chemie der Universität Stuttgart.
- [80] Scheicher, U. (2004): Referat an der ETH Zürich vom 13.12.2004. Einsatz von modifiziertem Holz für Parkett.
- [81] Schweizerisches Landesforstinventar: <http://www.lfi.ch/>, 12.11.04
- [82] Sonderegger, W.; Niemz, P. (2001): Untersuchungen zur Bestimmung der Brinellhärte an MDF- und HDF-Platten mittels Wegmessung. ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Gruppe Holzphysik. Int. Bericht Nr. 3.
- [83] Stamm, A. J. (1964): Wood and cellulose science. New York.
- [84] STIA Holzindustrie GmbH: <http://www.stia.at/>, 16.12.2004
- [85] Storm, R. (2001): Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. 11. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig.
- [86] Stübi, T.; Niemz, P. (2000): Neues Messgerät zur Bestimmung der Härte. Universalmesssystem für erhöhte Genauigkeit bei der Ermittlung der Brinell-Härte an Holzwerkstoffen (1). Holz-Zentralblatt 114:1524/1526
- [87] Teischinger, A.; Stingl, R. (2002): Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte, Lignovisionen Band 3. Institut für Holzforschung und VHÖ, Universität für Bodenkultur Wien.

- [88] Tiemann, H. D. (1947): Wood Technology, constitution, properties and uses. Sir Isaac Pitman & sons LTD London.
- [89] Verband der Deutschen Parkettindustrie vdp (2004), Auszug aus dem Geschäftsbericht 2003. Düsseldorf
- [90] Von Büren, S. (2002): Der Farbkern der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der Schweiz nördlich der Alpen. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen Nr. 86. Schweizer Forstverein, ETH Zentrum Zürich.
- [91] Vorreiter, L. (1949): Holztechnologisches Handbuch. Band 1, Allgemeines, Holzkunde, Holzschutz und Holzvergütung. Verlag Georg Fromme & Co., Wien.
- [92] Wagenführ, R. (1996): Holzatlas, 4. neubearbeitete Auflage. Fachbuchverlag Leipzig.
- [93] Wagenführ, R. (1999): Anatomie des Holzes. 5. überarbeitete Auflage. DRW-Verlag Leinfelden-Echterdingen.
- [94] Walter, M. (1991): Qualitative und quantitative Aspekte der Buchen-Nasskernbildung. Dissertation Nr. 9604 ETH Zürich.
- [95] Werner, F.; Klaus, R. (1997): Ökologische Untersuchungen von Parkettfußböden. Betrachtung von Mosaik-KlebeParkett, Fertigparkett, 2-Schichtig und Fertigparkett, 3-Schichtig. Abteilung Holz, EMPA Dübendorf.
- [96] Zeltner, S. (2000): Schweizerische Handelsgebräuche für Rundholz. Waldwirtschaft Verband Schweiz, Solothurn.
- [97] Zycha, H. (1948): Über die Kernbildung und verwandte Vorgänge im Holz der Rotbuche. Forstw. Cbl. 67/2, S. 80-109.

Abkürzungen und Symbole

b	Breite	REM	Rasterelektronenmikroskop
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft	r.L.	relative Luftfeuchte
CH	Schweiz	s	Standartabweichung
CIE	Commission Internationale de l'Eclairé	s^2	Varianz
d	Durchmesser der Kugelkalotte	T-u-	Temperatur-Feuchte-
D	Kugeldurchmesser	t-Wert	Signifikanzmass
D	Deutschland	u	Holzfeuchtigkeit
DIN	Deutsche Industrienorm	UV	Ultraviolett
DL	Durchbiegung zwischen XH, XL	V	Volumen
E	Bestrahlungsstärke	vdp	Verband der Deutschen Parkettindustrie
E_{II}	Elastizitätsmodul parallel zur Faser	VTT	Technisches Forschungszentrum Finnland Helsinki
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt	XH	Ende der E-Modulermittlung
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	XL	Beginn der E-Modulermittlung
F	Prüfkraft	σ_{bBII}	Biegefestigkeit parallel zur Faser
F	Frankreich	n	Anzahl Einheiten
FI	Finnland	ρ	Dichte
FTA	Finnish Thermowood Association	x_i	Einzelwert einer Stichprobe
h	Höhe	\bar{x}	Mittelwert
H	Bestrahlung	α	Signifikanzniveau
$H_{B\perp}$	Brinellhärte quer zur Faser	\sum	Summe
H_{BII}	Brinellhärte parallel zur Faser	α_Q	Quellmass
HSB	Hochschule für Architektur, Bau und Holz	%	Prozent
$L^*a^*b^*$	Farbkoordinaten: L* Helligkeit, a* Rot-Grün-Anteil, b* Gelb- Blau-Anteil	ΔE	Farbdifferenz
l_0	Dimension des wasserfreien Holzes	ΔL	Helligkeitsdifferenz
LFI	Schweizerisches Landesforstinventar	$^{\circ}C$	Grad Celsius
l_s	Stützweite		
l_u	Dimension bei feuchtem Holz		
m_o	Masse des wasserfreien Holzes		
m_u	Masse des feuchten Holzes		
NL	Niederland		
NOW S.A.	New Option Wood SA		
OH ⁻	Hydroxylgruppen		
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe		
PCM	Process Management		
r	Radius		
R^2	Bestimmtheitsmass		

Abbildungen

Abbildung 1: Einsatz von thermisch behandelte Buche am Flughafen Zürich	4
Abbildung 2: A) Buchenstämme mit Rotkern auf dem Rundholzplatz der Firma A+C Corbat sa in Vendlincourt (JU). Linker Stamm mit rund abgesetztem Rotkern und rechter Stamm mit spritzförmig abgesetztem Rotkern. B) Buchenholz mit ausgeprägtem Rotkern [40]	8
Abbildung 3: A) Eschenstämme mit Braunkernanteil im Staatswald Teufen (ZH) [39]. B) Eschenholz mit Braunkern	9
Abbildung 4: A): REM-Aufnahme von <i>Fraxinus excelsior</i> , tangential. Gefässbahnen mit Thyllenausstülpungen (1. und 3. Gefässbahn von links) [7]. B) REM-Aufnahme von <i>Fraxinus excelsior</i> tangential. Thyllenausstülpung in ein Gefäss [7]	10
Abbildung 5: Thermokammer der Firma Mühlböck [45]	18
Abbildung 6: Autoklav für die thermische Behandlung in Stickstoffatmosphäre der Firma Balz AG	19
Abbildung 7: Aufbau eines Holzbodens mit Massivholzdielen [52]	23
Abbildung 8: CIEL*a*b Farbraum, a und b stellen Farbwerte in Rot-Grün-Richtung bzw. Blau-Gelb-Richtung dar. L steht für die Helligkeit. ΔE^*_{ab} ist der geometrische Abstand zweier Farben im L*a*b*-Farbraum [38]	24
Abbildung 9: Einteilung der Vorversuche in hydrothermische und thermische Behandlung.....	33
Abbildung 10: Umlufttrockenschrank der Firma Salvis. Links PC mit Datenlogger	36
Abbildung 11: Umlufttrockenschrank der Firma Salvis beschickt mit Buchenprüfkörper zur Farb- und Härtemessung oben, zur Biegefestigkeitsmessung mitte und Sorptions- und Quellungsmessung unten	36
Abbildung 12: Farbmessgerät Chroma-Meter CR-200 von Minolta (rechts), Schablone und Prüfkörper sowie Messkopf (mitte), Laptop zur Datenverwaltung (links).....	38
Abbildung 13: UV-Bewitterungsanlage QUV Accelerated Weathering tester der Firma Q-Panel mit offenem Deckel und eingesetzten Prüfkörpern.....	39
Abbildung 14: Links: Klimaschrank der Firma Espec beschickt mit Prüfkörper zur Messung der Sorptions- und Quellungseigenschaften. Rechts: PC mit Datenlogger zur Überwachung der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit	41
Abbildung 15: Härteprüfung an der Universalprüfmaschine	44
Abbildung 16: Dreipunktelastung zur Prüfung der Biegefestigkeit nach DIN 52186 [29].....	45
Abbildung 17: Biegeprüfung an der Universalprüfmaschine	45
Abbildung 18: Das verwendete Buchenholz mit Rotkern vor der thermischen Behandlung	47
Abbildung 19: Obere Reihe: Buche mit Rotkern, untere Reihe: Buche ohne Rotkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/160°C, behandelt 12h/160°C, behandelt 24h/160°C.....	48
Abbildung 20: Obere Reihe: Buche mit Rotkern, untere Reihe: Buche ohne Rotkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/180°C, behandelt 12h/180°C, behandelt 24h/180°C.....	49
Abbildung 21: Links: Buchenlamelle mit Rotkernanteil, unbehandelt. Mitte: Buchenlamelle mit Rotkernanteil behandelt während 12 h bei 180° C. Rechts Buchenlamelle behandelt während 24 h bei 180° C. Rotkernanteil markiert durch den Pfeil	51
Abbildung 22: Das verwendete Eschenholz mit Braunkern vor der thermischen Behandlung.....	52
Abbildung 23: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/160°C, behandelt 12h/160°C, behandelt 24 h/160°C.....	53
Abbildung 24: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/180°C, behandelt 12h/180°C, behandelt 24h/180°C.....	54
Abbildung 25: Obere Reihe: Esche mit Braunkern, untere Reihe: Esche ohne Braunkern. Von links nach rechts: unbehandelt, behandelt 6h/200°C, behandelt 12h/200°C, behandelt 24h/200°C.....	55
Abbildung 26 Links: Eschenlamelle mit Braunkernanteil, unbehandelt. Mitte: Eschenlamelle mit Braunkernanteil behandelt während 6 h bei 180° C. Rechts Eschenlamelle behandelt während 24 h bei 180° C. Braunkernanteil markiert durch den Pfeil.....	57
Abbildung 27: Buchenproben mit Rotkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Von links nach rechts: Unbehandelt, thermisch behandelt bei 6h/180°C, thermisch behandelt bei 12h/180°C und thermisch behandelt bei 24h/180°C. Obere 2/3 der Probenfläche bestrahlt unteres Drittel der Probenfläche unbestrahlt.....	58
Abbildung 28: Versiegelte Buchenproben mit Rotkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Oben: Wasserlack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Unten: Acryllack Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Gelber Pfeil markiert den unbestrahlten Bereich, schwarzer Pfeil markiert den bestrahlten Bereich	60

Abbildung 29: Eschenproben mit Braunkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Von links nach rechts:
Unbehandelt, thermisch behandelt bei 6h/180°C, thermisch behandelt bei 12h/180°C, thermisch
behandelt bei 24h/180°C. Obere 2/3 der Probenfläche bestrahlt unteres Drittel der Proben
unbestrahlt 61

Abbildung 30: Versiegelte Eschenproben mit Braunkernanteil nach der UV-Bestrahlung. Oben Wasserlack
Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Unten Acrylatlack
Versiegelung, links unbehandelt, rechts thermisch behandelt bei 24h/180°C. Gelber Pfeil markiert
den unbestrahlten Bereich, schwarzer Pfeil markiert den bestrahlten Bereich..... 63

Abbildung 31: REM-Aufnahme von unbehandelter Buche im Querschnitt 78

Abbildung 32: A und B: REM-Aufnahmen von thermisch behandelter Buche mit Rotkern (6h/200°C),
Querschnitt. Rote Pfeile markieren die Risse, gelbe Pfeile eine Ablösung der Zellen untereinander im
Bereich der Mittellamelle..... 78

Abbildung 33: REM-Aufnahme von unbehandelter Esche ohne Braunkern, Querschnitt 79

Abbildung 34: A und B: REM-Aufnahme von thermisch behandelter Esche ohne Braunkern (24h/180°C),
Querschnitt. B: Vergrößerung aus Bild A. Die gelben Pfeile Markieren Ablösungen in der Zellwand
sowie zwischen den Zellen. 79

Tabellen

Tabelle 1: Modifizierungsverfahren und deren Wirkung auf die Zellwand nach Militz [66]	11
Tabelle 2: Technologieentwickler von thermischen Vergütungsprozesse, deren Verfahren und produzierte Menge nach Ewert [30]	16
Tabelle 3: Wellenlängen im UV-Bereich und deren Wirkung [79] nm = Nanometer	25
Tabelle 4: Physikalische Kennwerte von rotkerniger Buche und Buche ohne Rotkern nach Molnàr et al [67]. Werte zum Vergleich nach Wagenführ [92] \parallel = parallel zur Faser, \perp = quer zur Faser	30
Tabelle 5: Holzfeuchtigkeit, Rohdichte und Darrdichte nach Lagerung im Normalklima von Buche vor der thermischen Behandlung. Links Buche ohne Rotkern, rechts Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung	30
Tabelle 6: Physikalische Kennwerte von braunkerniger Esche und Esche ohne Braunkern nach Kollmann [58]. Werte zum Vergleich nach Wagenführ [92] \parallel = parallel zur Faser, \perp = quer zur Faser	31
Tabelle 7: Holzfeuchtigkeit, Rohdichte und Darrdichte nach Lagerung im Normalklima von Esche vor der thermischen Behandlung. Links Esche ohne Braunkern, rechts Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung	32
Tabelle 8: Behandlungsserien von Esche	35
Tabelle 9: Behandlungsserien von Buche	35
Tabelle 10: Parameter der künstlichen Bestrahlung	40
Tabelle 11: Zeitpunkt der Farbmessung während der UV-Bestrahlung	40
Tabelle 12: Die verschiedenen Klimastufen zur Bestimmung der Fechteverformung und Sorptionseigenschaften	42
Tabelle 13: Maschineneinstellungen der Biegeprüfung . XL = Beginn der E-Modulermittlung, XH = Ende der E-Modulermittlung	46
Tabelle 14: Farbkennwerte L^* , a^* und b^* der unbehandelten Buchenproben. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern	48
Tabelle 15: Helligkeitsdifferenz ΔL und Farbdifferenz ΔE zwischen der rotkernigen Buche und der Buche ohne Rotkern im unbehandelten Ausgangszustand. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung	48
Tabelle 16: Farbkennwerte L^* , a^* und b^* der unbehandelten Eschenproben: \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern	53
Tabelle 17: Helligkeitsdifferenz ΔL und Farbdifferenz ΔE des braunkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Braunkern von un behandelter Esche	53
Tabelle 18: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern vor der Härteprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern	70
Tabelle 19: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Esche mit Braunkern und Esche ohne Braunkern vor der Härteprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern	72
Tabelle 20: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Buche mit Rotkern und Buche ohne Rotkern vor der Biegefestigkeitsprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, RK = Rotkern	74
Tabelle 21: Rohdichte und Holzfeuchte nach der thermischen Behandlung und nach Lagerung im Normalklima von Esche mit Braunkern und Esche ohne Braunkern vor der Biegefestigkeitsprüfung. \bar{x} = Mittelwert, s = Standardabweichung, BK = Braunkern	76

Diagramme

Diagramm 1: Einsatzgebiete und deren Anteil von thermisch behandeltem Holz in 2003 Europa [30]	17
Diagramm 2: Spektrale Energieverteilung von UV-A, UV-B und Sonnenstrahlung [65].....	25
Diagramm 3: Temperaturverlauf der thermischen Behandlung bei 24 h Behandlungszeit und 200° C Behandlungstemperatur.....	37
Diagramm 4: Kraft-Eindringtiefe-Diagramm mit plastischer und elastischer Verformung	44
Diagramm 5: Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des rotkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Rotkern von unbehandelter Buche. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des rotkernigen und des Probenkollektives ohne Rotkern unbehandelter Buche. RK = Rotkern.....	47
Diagramm 6: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern.....	48
Diagramm 7: L^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern	49
Diagramm 8: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern.....	49
Diagramm 9: L^* -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern	50
Diagramm 10: Helligkeitsdifferenz ΔL zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160° C und 180° C Behandlungstemperatur	50
Diagramm 11: Farbdifferenz ΔE zwischen Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160° C und 180° C Behandlungstemperatur.....	51
Diagramm 12: Links: Vergleich der a^*b^* -Werte des braunkernigen Probenkollektives und des Probenkollektives ohne Braunkern von unbehandelter Esche. Rechts: Vergleich des Helligkeitswertes L^* des braunkernigen und des Probenkollektives ohne Braunkern unbehandelter Esche. BK = Braunkern	52
Diagramm 13: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	53
Diagramm 14: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 160° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	54
Diagramm 15: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	54
Diagramm 16: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 180° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	55
Diagramm 17: links a^* -Werte und rechts b^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	55
Diagramm 18: L^* -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungsdauer bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern.....	56
Diagramm 19: Helligkeitsdifferenz ΔL von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160, 180 und 200° C Behandlungstemperatur	56
Diagramm 20: Farbdifferenz ΔE zwischen Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 160, 180 und 200° C Behandlungstemperatur.	57
Diagramm 21: Helligkeitsdifferenz ΔL von thermisch behandelte Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche.....	59
Diagramm 22: Farbdifferenz ΔE von thermisch behandelte Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche.....	59
Diagramm 23: Helligkeitsdifferenz ΔL von versiegelter, thermisch behandelte Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche. A = Acrylatlack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)	60
Diagramm 24: Farbdifferenz ΔE von versiegelter, thermisch behandelte Buche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Buche. A = Acrylatlack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)	61
Diagramm 25: Helligkeitsdifferenz ΔL von thermisch behandelte Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche	62

Diagramm 26: Farbdifferenz ΔE von thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche	62
Diagramm 27: Helligkeitsdifferenz ΔL von versiegelter, thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche. A = Acryllack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung)	63
Diagramm 28: Farbdifferenz ΔE von versiegelter, thermisch behandelter Esche bei 6h/180°C, 12h/180°C und 24h/180°C nach der UV-Bestrahlung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer. Im Vergleich unbehandelte Esche. A = Acryllack (Werkversiegelung), B = Wasserlack (Bauversiegelung).....	64
Diagramm 29: Sorptionsisothermen von Buche der Behandlungsserien von 180° C links, 160° C und 200° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern.....	65
Diagramm 30: Quellmass von Buche in radialer Richtung der Behandlungsserien von 180° C links, 160° C und 200°C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern	66
Diagramm 31: Quellmass von Buche in tangentialer Richtung der Behandlungsserien von 180° C links, 160°C und 200°C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. RK = Rotkern	66
Diagramm 32: Sorptionsisotherme von Esche der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern	67
Diagramm 33: Quellmass von Esche in radialer Richtung der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern.....	67
Diagramm 34: Quellmass von Esche in tangentialer Richtung der Behandlungsserien von 200° C links, 160° C und 180° C rechts. Im Vergleich dazu die unbehandelte Serie. BK = Braunkern.....	68
Diagramm 35: Masseverlust von Buche bezogen auf die Darrmasse vor der Behandlung. RK = Rotkern .	69
Diagramm 36: Masseverlust von Esche bezogen auf die Darrmasse vor der Behandlung. BK = Braunkern	69
Diagramm 37: Härte von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur. RK = Rotkern	71
Diagramm 38: Härte von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern.....	71
Diagramm 39: Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte der untersuchten Serien von Buche. Links Härte in radialer Richtung, rechts Härte in tangentialer Richtung. R^2 = Bestimmtheitsmass	72
Diagramm 40: Härte von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur. BK = Braunkern	73
Diagramm 41 : Härte von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur bei 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern	73
Diagramm 42: Einfluss der Rohdichte auf die Brinellhärte der untersuchten Serien von Esche. Links Härte in radialer Richtung, rechts Härte in tangentialer Richtung. R^2 = Bestimmtheitsmass	74
Diagramm 43: Biegefestigkeit von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern	75
Diagramm 44: Elastizitätsmodul von thermisch behandelter Buche mit und ohne Rotkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 180° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 6 h Behandlungszeit. RK = Rotkern	75
Diagramm 45: Biegefestigkeit von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern	76
Diagramm 46: Elastizitätsmodul von thermisch behandelter Esche mit und ohne Braunkern parallel zur Faser. Links in Abhängigkeit der Behandlungszeit bei 200° C Behandlungstemperatur und rechts in Abhängigkeit der Behandlungstemperatur nach 24 h Behandlungszeit. BK = Braunkern	77

Formeln

Formel 1: Arithmetischer Mittelwert.....	27
Formel 2: Varianz	27
Formel 3: Standardabweichung	27
Formel 4: t-Wert.....	28
Formel 5: t-Wert wenn $n_1 = n_2 = n$	28
Formel 6: Farbdifferenz	38
Formel 7: Helligkeitsdifferenz.....	38
Formel 8: Holzfeuchtegehalt nach DIN 52183 [27]	41
Formel 9: Quellmass	41
Formel 10: Normalrohddichte nach DIN 52182 [26].....	42
Formel 11: Darrdichte nach DIN 52182 [26].....	42
Formel 12: Brinellhärte.....	43
Formel 13: Eindringtiefe	43
Formel 14: Brinellhärte berechnet über die Eindringtiefe	43
Formel 15: Biegespannung	45
Formel 16: E-Modul	45

Zwingende Formen

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit selbständig und ohne jegliche Hilfe verfasst habe, nicht anderweitig als Diplomarbeit vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemässe Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ich habe die Bestimmungen der HSB über Rechte und Pflichten namentlich über die Urheber- und Nutzungsrechte, des Genehmigungsverfahrens für Publikationen sowie Sperrfristen, zur Kenntnis genommen.

Ort und Datum: **Zürich, 25. Februar 2005**

Unterschrift:.....

Note / Abnahmeerklärung

Die vorliegende Arbeit ist als Diplomarbeit an der HSB, Fachbereich Holz entgegengenommen worden:

Gesamtnote der Diplomarbeit:

(zusammengesetzt aus den Teil Noten A-C)

Name erstprüfender Dozent:..... Unterschrift:.....

Name zweitprüfender Dozent:..... Unterschrift:.....

Name Experte:..... Unterschrift:.....

Ort und Datum:.....

Teilnoten

Note A 50 %	Fachliche Problemlösung Fachliches Urteil, Qualität der Ergebnisse (Schlussfolgerungen), Vorgehen, Logistik
Note B 25 %	Methodische Problembearbeitung Kreativität, Systematik, Eigeninitiative, eigenkritische Bewertung, Einsatz
Note C 25 %	Soziale Vermittlung der Ergebnisse Sprache, Verständlichkeit der Darstellung, Einhalten der Formen, Vortrag (Klarheit, Präsentationsmittel), Abstract als Publikationsmittel

Anhang

Inhaltsverzeichnis

A 1 VERZEICHNISSE.....	1
A 1.1 Abbildungsverzeichnis	1
A 1.2 Tabellenverzeichnis.....	2
A 1.3 Diagrammverzeichnis.....	4
A 2 PARKETTARTEN.....	5
A 3 VORVERSUCHE	7
A 3.1 Thermische Behandlung im Vakuum.....	7
A 3.2 Hydrothermische Behandlung im Autoklav	8
A 3.3 Kochbehandlung	10
A 3.4 Ergebnisse der Vorversuche.....	11
A 3.4.1 Thermische Behandlung in Luftgasatmosphäre	11
A 3.4.2 Thermische Behandlung im Vakuum	11
A 3.4.3 Hydrothermische Behandlung im Autoklav.....	12
A 3.4.4 Kochbehandlung	13
A 4 WERTETABELLEN	14
A 5 DIAGRAMME DER MECHANISCHEN PRÜFUNGEN	47
A 6 T-WERTE	70
A 7 MERKBLÄTTER	71
A 7.1 Acrylatlack.....	71
A 7.2 Wasserlack Grundierung.....	72
A 7.3 Wasserlack Deckauftrag	73
A 8 NACHWEIS DER BRINELLHÄRTEFORMEL	74

A 1 Verzeichnisse

A 1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung A-1: Mosaikparkett in Eiche	5
Abbildung A-2: Parketriemen mit angefräster Nut und Feder aus Buche	5
Abbildung A-3 Fertigparkettelement, 3-schichtig mit angefräster Nut und Feder. Deckschicht besteht aus drei Stäben.....	6
Abbildung A-4: Vakuumtrockenschrank der Heraeus mit Kondensationseinheit (mitte) und Vakuumpumpe (links)	7
Abbildung A-5: Schematische Darstellung eines Laborautoklaves Firma SanoClav	9
Abbildung A-6: Laborautoklav der Firma SanoClav	9
Abbildung A-7: Kochbehälter der Firma Salvis, rechts Etageneinsatz.....	10
Abbildung A-8: A) Buche, links 8 h behandelt im Umlufttrockenschrank bei 180° C. Rechts unbehandelt. B) Buche, links 12 h behandelt im Umlufttrockenschrank bei 200° C. Rechts unbehandelt	11
Abbildung A-9: A) Buche, links 20 h behandelt im Vakuum bei 200° C. Rechts unbehandelt. B) Esche, links 20 h behandelt im Vakuum bei 200° C. Rechts unbehandelt	11
Abbildung A-10: A) Buche, links behandelt im Autoklav bei 140° C während 4 h, rechts unbehandelt. B) Esche, links behandelt im Autoklav bei 140° C während 4 h, rechts unbehandelt	12
Abbildung A-11: Rissbildung bei Buche nach sofortigem Druckausgleich nach der Behandlung im Autoklav	12
Abbildung A-12: A) Buche, links 20 h behandelt in kochendem Wasser. Rechts unbehandelt. B) Esche, links 20 h behandelt in kochendem Wasser. Rechts unbehandelt	13

A 1.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle A-1: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Buche ohne Rotkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normklima (20°C/65% r.L.).....	14
Tabelle A-2: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Buche mit Rotkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normklima (20°C/65% r.L.).....	15
Tabelle A-3: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Esche ohne Braunkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normklima (20°C/65% r.L.).....	16
Tabelle A-4: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Esche mit Braunkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normklima (20°C/65% r.L.).....	17
Tabelle A-5: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern vor der thermischen Behandlung. RK = Rotkern, Normklima 20°C/65% r.L. = (20/65).....	18
Tabelle A-6: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern nach der thermischen Behandlung bei 160° C. RK = Rotkern.....	19
Tabelle A-7: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern nach der thermischen Behandlung bei 180° C. RK = Rotkern.....	20
Tabelle A-8: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern vor der thermischen Behandlung. BK = Braunkern, Normklima 20°C/65% r.L. = (20/65).....	21
Tabelle A-9: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 160° C. BK = Braunkern.....	22
Tabelle A-10: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 180° C. BK = Braunkern.....	23
Tabelle A-11: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 200° C. BK = Braunkern.....	24
Tabelle A-12: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung.....	25
Tabelle A-13: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Acrylatlack Versiegelung.....	26
Tabelle A-14: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Wasserlack Versiegelung.....	27
Tabelle A-15: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung.....	28
Tabelle A-16: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Acrylatlack Versiegelung.....	29
Tabelle A-17 a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Wasserlack Versiegelung.....	30
Tabelle A-18: Holzausgleichsfeuchte in % von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit.....	31
Tabelle A-19: Quellmass in % von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit.....	32
Tabelle A-20: Holzausgleichsfeuchte in % von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit.....	33
Tabelle A-21: Quellmass in % von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit.....	34
Tabelle A-22: Masseänderung und Volumenänderung von Buche ohne Rotkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung.....	35
Tabelle A-23: Masseänderung und Volumenänderung von Buche mit Rotkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung.....	36
Tabelle A-24: Masseänderung und Volumenänderung von Esche ohne Braunkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung.....	37
Tabelle A-25: Masseänderung und Volumenänderung von Esche mit Braunkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung.....	38
Tabelle A-26: Brinellhärte der Buchenserien bei 180°C und Werte der unbehandelten Serie in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. RK = Rotkern.....	39
Tabelle A-27: Brinellhärte der Buchenserien nach 6h Behandlungszeit in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. RK = Rotkern.....	40
Tabelle A-28: Brinellhärte der Eschenserien bei 200°C und Werte der unbehandelten Serie in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. BK = Braunkern.....	41

Tabelle A-29: Brinellhärte der Eschenserien nach 24 h Behandlungszeit in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. BK = Braunkern	42
Tabelle A-30: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Buchenserien bei 180° C und Werte der unbehandelten Serie parallel zur Faser. RK = Rotkern	43
Tabelle A-31: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Buchenserien nach 6 h Behandlungszeit parallel zur Faser. RK = Rotkern	44
Tabelle A-32: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Eschenserien bei 200° C und Werte der unbehandelten Serie parallel zur Faser. BK = Braunkern.....	45
Tabelle A-33: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Eschenserien nach 24 h Behandlungszeit parallel zur Faser. BK = Braunkern.....	46
Tabelle A-34: Schwellenwerte t der t-Verteilung [71]	70

A 1.3 Diagrammverzeichnis

Diagramm A-1: Schematischer Temperaturverlauf bei der Druckdämpfung im Autoklav	8
Diagramm A-2: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von unbehandelter Buche.....	47
Diagramm A-3: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/160°C.....	48
Diagramm A-4: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/200°C.....	49
Diagramm A-5: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/180°C.....	50
Diagramm A-6: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 12h/180°C.....	51
Diagramm A-7: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 24h/180°C.....	52
Diagramm A-8: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/160°C	53
Diagramm A-9: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/180°C	54
Diagramm A-10: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/200°C.....	55
Diagramm A-11: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 12h/200°C.....	56
Diagramm A-12: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 6h/200°C	57
Diagramm A-13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von unbehandelter Buche. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	58
Diagramm A-14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/160°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	59
Diagramm A-15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	60
Diagramm A-16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	61
Diagramm A-17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 12h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	62
Diagramm A-18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 24h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	63
Diagramm A-19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von unbehandelter Esche. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	64
Diagramm A-20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/160°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	65
Diagramm A-21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	66
Diagramm A-22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	67
Diagramm A-23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 12h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	68
Diagramm A-24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 6h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)	69

A 2 Parkettarten

Mosaikparkett



Abbildung A-1: Mosaikparkett in Eiche

Mosaikparkett besteht aus einzelnen Lamellen, die zu verschiedenen Verlegeeinheiten zusammengesetzt werden. Die unterschiedlichen Verlegemuster werden auf der Rückseite mit einem Klebenetz zu einer Platte zusammengehalten. Die Platte wird mit dem Netz nach unten auf den Unterboden vollflächig verklebt und verlegt. Die am häufigsten verlegte Form ist das Würfelmuster. Die Dicke der einzelnen Lamellen ist in DIN 280 Teil 2 [22] auf acht Millimeter festgelegt. Die Lamellen können bis 25 Millimeter breit und 165 Millimeter lang sein. Eine weitere entscheidende Bedingung in der Norm betrifft die Holzfeuchte, die bei 9 % (± 2 %) liegen muss. Mosaikparkettlamellen werden industriell in verschiedenen Holzarten gefertigt. Am häufigsten wird Eiche eingesetzt, aber auch Holzarten aus Übersee werden häufig zu Mosaikparkett verarbeitet. Das Schleifen und die Oberflächenbehandlung werden nach der Verlegung auf der Baustelle durchgeführt.

10-mm-Massivparkett

Das 10-mm-Massivparkett berücksichtigt die Norm nicht. Ein anderer Name für diese Parkettart ist das Lamparkett. Vom Aufbau her ist es mit dem Mosaikparkett vergleichbar. Wie jedoch aus dem Namen bereits hervorgeht ist es in der Regel 10 Millimeter dick. Neben der Eiche findet die Buche in zunehmendem Mass Verwendung.

Stabparkett

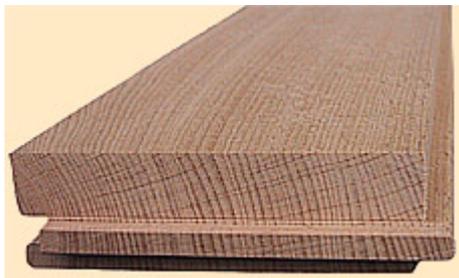


Abbildung A-2: Parketriemen mit angefräster Nut und Feder aus Buche

Das Stabparkett besteht aus Parkettstäben oder Parketriemen. Parkettstäbe sind ringsum genutet, die beim Verlegen durch Federn verbunden werden. Parketriemen sind mit einer angefrästen Nut und Feder versehen. Das Stabparkett wird vollflächig auf dem Untergrund verklebt. Auch sieht die Norm [23] einen Feuchtegehalt von 9 % (± 2 %) vor. Parkettstäbe und –riemen werden in verschiedenen Holzarten hergestellt, z. B. Eiche, Buche sowie exotische Holzarten. Das Schleifen und die Oberflächenbehandlung werden nach dem Verlegen auf der Baustelle durchgeführt.

Fertigparkett



Abbildung A-3 Fertigparkettelement, 3-schichtig mit angefäster Nut und Feder. Deckschicht besteht aus drei Stäben

Fertigparkett ist ein industriell hergestelltes, oberflächenbehandeltes Fussbodenelement mit Nut- und Federverbindung. Fertigparkettelemente sind mehrschichtig abgesperrt. Darum wird auch von Mehrschichtparkett gesprochen. Die Deckschicht kann aus eins, zwei oder drei Stäben pro Element bestehen. Durch die Absperrung sind die Elemente in jeder Richtung formstabiler als einschichtige Elemente und können daher schwimmend, das heisst ohne feste Verbindung mit dem tragenden Unterlagsboden, verlegt werden. Neben dem klassischen dreischichtigen Aufbau, Deckschicht, Mittellage und Unterzug, gibt es auch zweischichtige Elemente. Die Deckschicht, auch Nuttschicht genannt, mit einer Mindestdicke von zwei Millimetern muss immer aus Vollholz sein, während die Mittellage und der Unterzug aus Holzwerkstoffen oder anderen Materialien bestehen können. Häufig bestehen Mittellage und Unterzug aus Nadelholz. In der Deckschicht finden die unterschiedlichsten Laubhölzer Verwendung. Bei Mehrschichtparkett gibt es kurze und lange Elemente in unterschiedlichen Ausführungen wie Landhausdielen, Schiffsböden, Stäbe, Flechtmuster und Tafелеlemente. Heute machen die Mehrschichtparkettarten den grössten Anteil der produzierten Menge an Parkett in Europa aus. Der Feuchtigkeitsgehalt der Fertigparkettelemente liegt nach der Norm [24] bei 8 % mit einer Toleranz von ± 2 %.

A 3 Vorversuche

A 3.1 Thermische Behandlung im Vakuum

Die Behandlung erfolgte unter Sauerstoffabschluss in einem Vakuumtrockenschrank der Firma Heraeus. Die bei der Erwärmung des Holzes entstehenden Gase entweichen in den Prozessraum, so dass kein vollständiges Vakuum erreicht werden konnte. Der Unterdruck durfte 50 mbar nicht überschreiten, um eine Beteiligung von Gasen an dem Vergütungsprozess auszuschliessen. Eine angeschlossene Vakuumpumpe saugte daher ständig die Luft aus dem Inneren des Schrankes ab. Die Wärmeübertragung auf die Prüfkörper erfolgte durch Wärmestrahlung der Metallverkleidung des Trockenschrankes. Vor der Behandlung wurde der Vakuumtrockenschrank auf die gewünschte Behandlungstemperatur vorgeheizt. Bei Erreichen der gewünschten Behandlungstemperatur wurden die Prüfkörper in den Schrank gelegt. Als weiterer Schritt wurde die verbleibende Luft im Schrank mittels der Vakuumpumpe evakuiert. Dabei konnte ein Vakuum von 20 bis 50 mbar erreicht werden. Die evakuierte Luft wurde an einer Kühleinheit kondensiert. So wurde ein Teil der Luftfeuchte, und der flüchtigen Stoffe, die bei der thermischen Zersetzung von Holz entstanden sind ausgeschieden.

Nach Ablauf der Behandlungszeit wurde die Heizung ausgeschaltet. Das Vakuum wurde beim Abkühlen auf ca. 60° C aufrechterhalten. So gelangte kein Luftsauerstoff in den heissen Prozessraum. Um die Proben dem Schrank entnehmen zu können, musste der Schrank zuerst wieder mit Luft geflutet werden. Danach wurden die Prüfkörper unter Normalklima in der Klimakammer abgekühlt.

Marke:	Heraeus
Gerätetyp:	VT 6060 M
Nutzraumvolumen:	371 x 415 x 345 mm ³
Temperaturbereich:	bis 220° C



Abbildung A-4: Vakuumtrockenschrank der Heraeus mit Kondensationseinheit (mitte) und Vakuumpumpe (links)

A 3.2 Hydrothermische Behandlung im Autoklav

Die Behandlung fand unter Überdruck und in gesättigtem Wasserdampf (Sattdampf), statt. Man spricht hier auch von einem Druckdampfprozess. Die Proben befanden sich dabei oberhalb eines Wasserbades, welches erhitzt wurde.

Die Wärmeübertragung im Druckbehälter erfolgte durch die Wärmeleitung des Wasserdampfes. Durch die Anwesenheit von Wasserdampf bestand eine hohe Brandsicherheit.

Der Druckdampfprozess lässt sich in drei Phasen aufteilen:

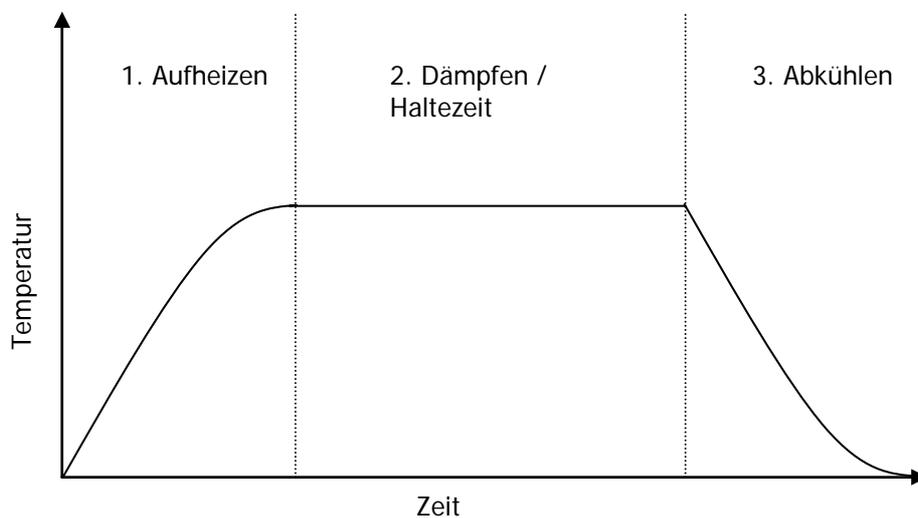


Diagramm A-1: Schematischer Temperaturverlauf bei der Druckdampfung im Autoklav

Sattdampfbedingungen lagen nur während der Dämpfphase vor, wenn die Temperatur im Autoklav über 100° C beträgt. Beim Aufheizen und Abkühlen lagen unterschiedliche Bedingungen mit Wirkung auf die Holzfeuchte vor.

Während des Aufheizens bis 100° C war das Abdampfventil geöffnet. Diese Periode erfolgte drucklos. Die Dauer betrug ca. 10 Minuten. Nach Erreichen von 99 – 100° C wurde nach ca. vier Minuten kräftigen Dampfaustritts das Abdampfventil geschlossen. Somit war der Autoklav ausreichend entlüftet, so dass sich eine reine Heissdampfatosphäre aufbauen konnte.

Während des Aufheizens kondensierte der Dampf auf der kalten Holzoberfläche. Dies führte bei trockenem Material zur Erhöhung der Holzfeuchte in den oberflächennahen Schichten. Die Wärmeübertragung wurde durch die Zunahme der Holzfeuchte erhöht.

Nach der Aufheizphase fand eine konstante Wärmezufuhr statt. Wärmeverluste des Autoklavs wurden durch Nachheizen ausgeglichen. Die Temperatur und der Druck waren während der Haltezeit konstant. Schwankungen der Temperatur wurden lediglich durch das Verhalten der Temperaturregelung verursacht. Die Aufheiz- und Abkühlphase wurden nicht zur Behandlungsdauer gezählt.

Der Abkühlvorgang bis Raumtemperatur (ca. 23° C) fand unter Druck statt und betrug ungefähr eine Stunde. Bei sofortigem Druckausgleich entstanden Risse im Holz.

Das Druckkammervolumen des Autoklavs beträgt 20 l. Vor der Behandlung wurden 1.5 l demineralisiertes Wasser bis zum Siebeinsatz eingefüllt. Ein Becken über dem Siebeinsatz fing die vom Holz abgegebenen wässrigen Extrakte auf. Die Prüfkörper lagen auf einem Etageinsatz.

Nach der Behandlung wurden die Proben einer technischen Trocknung unterzogen. Der Holzfeuchtegehalt nach der Behandlung lag weit über dem Fasersättigungsbereich.

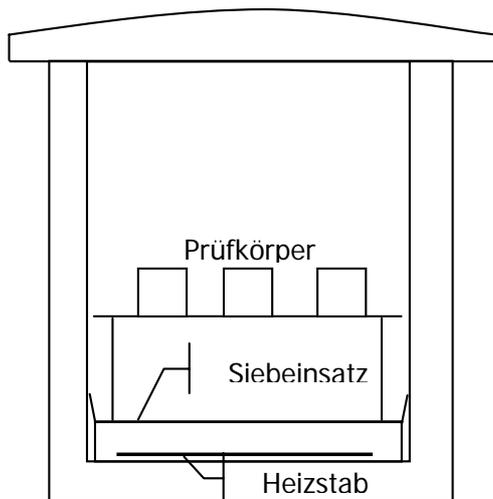


Abbildung A-5: Schematische Darstellung eines Laborautoklaves



Abbildung A-6: Laborautoklav der Firma SanoClav

A 3.3 Kochbehandlung

Hier handelte es sich um eine hydrothermische Behandlung im kochenden Wasser bei 100° C unter Normaldruck. Die Kochung der Prüfkörper fand in Kochbehältern der Firma Salvis mit integrierter Heizschleife statt. 7 l Wasser wurden zum kochen gebracht. Danach wurden die Prüfkörper im Etageinsatz in das kochende Wasser getaucht. Das während der Behandlung verdunstete Wasser musste von Zeit zu Zeit wieder nachgeführt werden.

Nach der Behandlungszeit von 2 bis 6 h wurden die Prüfkörper im Wasser auf Raumtemperatur abgekühlt.

Nach der Behandlung wurden die Proben einer technischen Trocknung unterzogen. Der Holzfeuchtegehalt nach der Behandlung lag weit über dem Fasersättigungsbereich.

Marke: Salvis
Gerätetyp: La-MCS-204
Volumen: 7 Liter



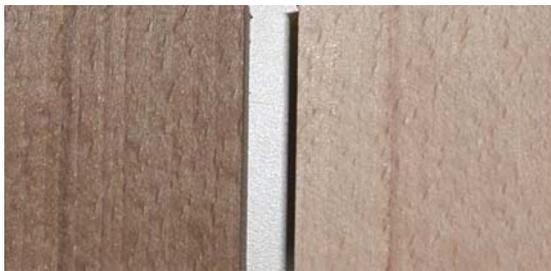
Abbildung A-7: Kochbehälter der Firma Salvis, rechts Etageinsatz

A 3.4 Ergebnisse der Vorversuche

Die Beurteilung erfolgte visuell durch den Bearbeiter. Es wurden keine Farbmessungen zur Auswertung der Vorversuche durchgeführt.

A 3.4.1 Thermische Behandlung in Luftgasatmosphäre

Die Behandlung im Umlufttrockenschrank ergab nach 8 h Behandlungszeit bei 180° C bereits eine deutliche Farbänderung. Bei weiterer Behandlungsdauer kam es zu zufriedenstellenden Egalisierungseffekten. Die Behandlung bei 200° C erwies sich vor allem bei Buche als zu stark. Nach ca. 12 h Behandlungszeit wurden vereinzelte Prüfkörper verkohlt. Esche hingegen war bei 200° C nicht verkohlt. Das behandelte Holz war rissfrei.



A



B

Abbildung A-8: A) Buche, links 8 h behandelt im Umlufttrockenschrank bei 180° C. Rechts unbehandelt. B) Buche, links 12 h behandelt im Umlufttrockenschrank bei 200° C. Rechts unbehandelt

A 3.4.2 Thermische Behandlung im Vakuum

Die Brandsicherheit war bei der Behandlung im Vakuum gewährleistet, solange die Anwesenheit von Luftsauerstoff ausgeschlossen war. Die Anlage bestehend aus Vakuumkammer, Vakuumpumpe, Kondens- und Kühleinheit war in der Bedienung und Wartung etwas anspruchsvoller als der Umlufttrockenschrank. Die flüchtigen Stoffe, die beim Vergütungsprozess aus dem Holz entwichen, verschmutzten die Vakuumpumpe trotz Ausscheidung durch Kondensation stark.



A



B

Abbildung A-9: A) Buche, links 20 h behandelt im Vakuum bei 200° C. Rechts unbehandelt. B) Esche, links 20 h behandelt im Vakuum bei 200° C. Rechts unbehandelt

A 3.4.3 Hydrothermische Behandlung im Autoklav

Die hydrothermische Behandlung im Autoklav ermöglichte schon bei 140° C eine ansprechende Farbänderung des Holzes. Das ist auf die erhöhte Wärmeübergabe der Wassermoleküle in der Dampfatmosfera zurückzuführen. Die Verfärbung fand zum grössten Teil in den ersten 4 h statt. Mit zunehmender Behandlungsdauer nahm die Dunkelfärbung nach 4 h nur noch gering zu. Behandlungen mit höheren Temperaturen hätten den Prozess erheblich beschleunigt und hätten zu relativ kurzen Behandlungszeiten geführt.



A B
Abbildung A-10: A) Buche, links behandelt im Autoklav bei 140° C während 4 h, rechts unbehandelt. B) Esche, links behandelt im Autoklav bei 140° C während 4 h, rechts unbehandelt

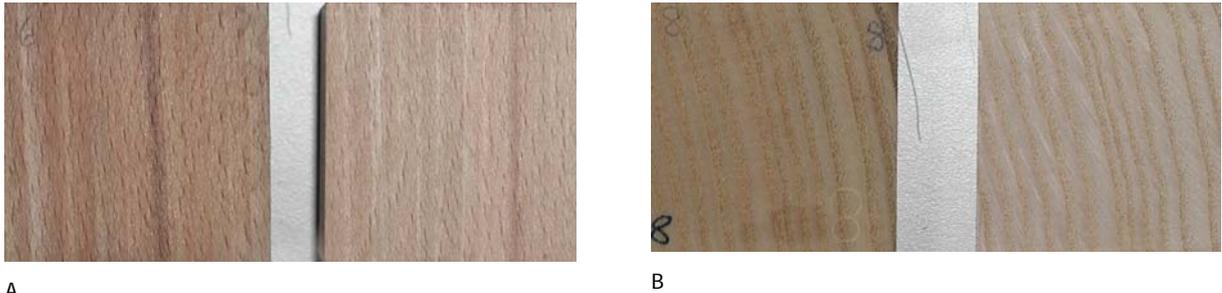
Ein sofortiger Druckausgleich führte nach der Behandlungsphase zu starker Rissbildung. Diese wurde jedoch durch langsames Abkühlen der Charge unter schrittweisem Druckabbau verhindert. Auch hier müsste das behandelte Holz einer nachträglichen Trocknung unterzogen werden.



Abbildung A-11: Rissbildung bei Buche nach sofortigem Druckausgleich nach der Behandlung im Autoklav

A 3.4.4 Kochbehandlung

Die Kochbehandlung erzielte die geringste Farbänderung. Die erreichte Dunkelfärbung lag im untersuchten Bereich deutlich unter den Anforderungen. Um eine ausreichende Farbänderung bei der Kochbehandlung zu erzielen wären Prozesszeiten von mehreren Tagen nötig. Nach der Behandlung betrug der Feuchtegehalt im Holz über 100 %. Somit war eine zusätzliche Trocknung für die Weiterverarbeitung des Holzes erforderlich. Die Kochbehandlung wäre im industriellen Massstab mit relativ einfachen Mitteln zu bewerkstelligen. Hierfür könnten bestehende Anlagen der Furnierherstellung (Kochanlagen) genutzt werden.



A

B

Abbildung A-12: A) Buche, links 20 h behandelt in kochendem Wasser. Rechts unbehandelt. B) Esche, links 20 h behandelt in kochendem Wasser. Rechts unbehandelt

A 4 Wertetabellen

Tabelle A-1: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Buche ohne Rotkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normalklima (20°C/65% r.L.)

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial (mm)	tangential (mm)	longitudinal (mm)	Masse (g)	Darrdichte [g/cm³]
61	vor der Behandlung (darr)	49,09	48,10	9,96	14,69	0,62
62	vor der Behandlung (darr)	49,07	47,99	10,01	14,66	0,62
63	vor der Behandlung (darr)	48,94	47,89	10,04	15,42	0,66
64	vor der Behandlung (darr)	48,93	47,90	10,02	15,12	0,64
65	vor der Behandlung (darr)	48,99	47,91	10,03	14,91	0,63
66	vor der Behandlung (darr)	48,96	47,98	10,05	14,86	0,63
67	vor der Behandlung (darr)	49,01	47,93	10,02	14,55	0,62
68	vor der Behandlung (darr)	48,93	47,85	10,01	15,37	0,66
69	vor der Behandlung (darr)	48,92	47,80	10,02	14,00	0,60
70	vor der Behandlung (darr)	48,98	47,87	10,01	14,80	0,63
81	vor der Behandlung (darr)	49,04	48,00	10,04	13,91	0,59
82	vor der Behandlung (darr)	49,05	47,99	10,01	13,93	0,59
83	vor der Behandlung (darr)	49,03	48,02	10,00	13,79	0,59
84	vor der Behandlung (darr)	49,05	48,02	10,03	13,81	0,58
85	vor der Behandlung (darr)	49,05	48,02	10,01	13,75	0,58
86	vor der Behandlung (darr)	49,02	47,98	9,96	14,06	0,60
87	vor der Behandlung (darr)	49,08	48,12	10,01	13,79	0,58
88	vor der Behandlung (darr)	49,06	48,06	9,99	14,51	0,62
89	vor der Behandlung (darr)	49,04	48,04	10,00	14,57	0,62
90	vor der Behandlung (darr)	49,01	48,04	10,02	14,77	0,63
101	vor der Behandlung (darr)	49,06	47,93	10,02	14,02	0,60
102	vor der Behandlung (darr)	49,15	48,19	10,01	14,64	0,62
103	vor der Behandlung (darr)	49,08	48,10	10,01	14,67	0,62
104	vor der Behandlung (darr)	49,01	48,02	10,00	14,03	0,60
105	vor der Behandlung (darr)	48,94	47,85	10,02	14,00	0,60
106	vor der Behandlung (darr)	48,97	48,00	10,01	13,99	0,59
107	vor der Behandlung (darr)	48,94	47,94	10,02	14,12	0,60
108	vor der Behandlung (darr)	48,99	47,97	10,00	14,02	0,60
109	vor der Behandlung (darr)	49,04	48,04	10,01	14,81	0,63
110	vor der Behandlung (darr)	49,00	48,01	9,99	14,64	0,62
121	vor der Behandlung (darr)	49,00	47,80	9,99	14,61	0,62
122	vor der Behandlung (darr)	48,95	47,88	9,97	14,63	0,63
123	vor der Behandlung (darr)	49,02	47,97	10,00	14,63	0,62
124	vor der Behandlung (darr)	48,97	47,95	9,99	14,61	0,62
125	vor der Behandlung (darr)	48,98	48,00	10,00	14,63	0,62
126	vor der Behandlung (darr)	48,95	47,86	10,04	13,97	0,59
127	vor der Behandlung (darr)	48,96	47,88	10,00	13,81	0,59
128	vor der Behandlung (darr)	48,97	47,95	10,04	13,78	0,58
129	vor der Behandlung (darr)	48,92	47,80	9,97	13,96	0,60
130	vor der Behandlung (darr)	48,93	47,80	10,02	14,00	0,60
Mittelwert						
Standardabweichung						
		0,06	0,09	0,02	0,46	0,02

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial (mm)	tangential (mm)	longitudinal (mm)	Masse (g)	Dichte [g/cm³]	Holzfeuchte (%)
61	vor der Behandlung (20/65)	50,08	50,04	10,01	16,50	0,66	12,31
62	vor der Behandlung (20/65)	50,08	50,03	10,02	16,42	0,65	12,00
63	vor der Behandlung (20/65)	50,09	50,03	10,05	17,32	0,69	12,35
64	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,02	10,04	16,98	0,68	12,35
65	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,04	10,05	16,73	0,66	12,17
66	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,04	10,06	16,66	0,65	12,14
67	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,03	10,04	16,31	0,65	12,11
68	vor der Behandlung (20/65)	50,08	49,99	10,05	17,26	0,69	12,32
69	vor der Behandlung (20/65)	49,99	49,99	10,04	15,76	0,63	12,56
70	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,01	10,04	16,59	0,66	12,08
81	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,03	10,05	15,63	0,62	12,37
82	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,03	10,02	15,66	0,62	12,40
83	vor der Behandlung (20/65)	50,07	50,03	10,06	15,49	0,61	12,30
84	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,03	10,05	15,49	0,62	12,21
85	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,02	10,03	15,42	0,61	12,15
86	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,05	9,98	15,78	0,63	12,23
87	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,08	10,03	15,49	0,62	12,32
88	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,05	10,00	16,29	0,65	12,22
89	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,03	10,03	16,35	0,65	12,19
90	vor der Behandlung (20/65)	50,08	50,02	10,04	16,57	0,66	12,21
101	vor der Behandlung (20/65)	50,07	49,99	10,05	15,78	0,63	12,49
102	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,04	10,05	16,42	0,65	12,18
103	vor der Behandlung (20/65)	50,07	50,07	10,03	16,45	0,65	12,09
104	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,00	10,03	15,76	0,63	12,31
105	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,01	10,04	15,73	0,63	12,40
106	vor der Behandlung (20/65)	50,01	50,01	10,03	15,73	0,63	12,42
107	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,05	10,04	15,90	0,63	12,60
108	vor der Behandlung (20/65)	50,00	49,99	10,02	15,78	0,63	12,52
109	vor der Behandlung (20/65)	50,10	50,04	10,04	16,62	0,66	12,22
110	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,06	10,02	16,44	0,65	12,25
121	vor der Behandlung (20/65)	49,98	49,96	10,04	16,28	0,65	11,43
122	vor der Behandlung (20/65)	50,06	49,93	10,01	16,33	0,65	11,62
123	vor der Behandlung (20/65)	50,02	49,98	10,03	16,38	0,65	11,96
124	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,01	10,02	16,36	0,65	11,98
125	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,08	10,01	16,39	0,65	12,03
126	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,04	10,03	15,71	0,62	12,46
127	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,02	10,03	15,46	0,62	11,95
128	vor der Behandlung (20/65)	50,00	49,99	10,07	15,38	0,61	11,61
129	vor der Behandlung (20/65)	49,98	49,92	10,01	15,63	0,63	11,96
130	vor der Behandlung (20/65)	49,96	50,01	10,05	15,63	0,62	11,64
Mittelwert							
Standardabweichung							
		0,03	0,04	0,02	0,52	0,02	0,26

Tabelle A-2: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Buche mit Rotkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normalklima (20°C/65% r.L.)

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Mass [g]	Dichte [g/cm ³]	Holzfeuchte [%]
71	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,02	10,02	17,70	0,70	12,61
72	vor der Behandlung (20/65)	50,07	50,02	10,00	18,48	0,74	12,97
73	vor der Behandlung (20/65)	50,01	50,01	10,01	18,58	0,74	12,92
74	vor der Behandlung (20/65)	50,06	49,99	10,02	18,50	0,74	12,83
75	vor der Behandlung (20/65)	50,02	49,99	10,02	18,27	0,73	12,99
76	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,08	10,03	18,49	0,74	12,99
77	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,01	10,02	18,40	0,73	13,12
78	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,03	10,00	18,21	0,73	12,94
79	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,02	10,03	18,29	0,73	13,00
80	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,00	10,01	18,12	0,72	12,71
91	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,01	10,01	18,23	0,73	13,00
92	vor der Behandlung (20/65)	50,02	49,98	10,03	18,25	0,73	12,92
93	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,03	10,00	17,78	0,71	12,93
94	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,03	10,02	18,47	0,74	13,10
95	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,01	10,05	17,99	0,71	12,83
96	vor der Behandlung (20/65)	50,00	49,96	10,02	18,43	0,74	12,93
97	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,00	10,02	18,52	0,74	13,01
98	vor der Behandlung (20/65)	50,01	49,98	10,04	18,53	0,74	13,08
99	vor der Behandlung (20/65)	50,01	50,02	10,02	18,51	0,74	13,11
100	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,05	10,03	18,61	0,74	13,10
111	vor der Behandlung (20/65)	50,07	49,98	10,03	18,03	0,72	12,65
112	vor der Behandlung (20/65)	50,06	50,00	10,06	17,69	0,70	12,78
113	vor der Behandlung (20/65)	50,04	49,99	10,03	18,51	0,74	13,14
114	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,05	9,99	18,43	0,74	13,15
115	vor der Behandlung (20/65)	50,07	49,99	10,02	18,55	0,74	13,08
116	vor der Behandlung (20/65)	50,03	50,02	10,00	18,30	0,73	12,97
117	vor der Behandlung (20/65)	50,00	49,97	9,99	18,48	0,74	13,04
118	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,01	9,99	18,32	0,73	12,97
119	vor der Behandlung (20/65)	49,99	50,05	10,04	17,94	0,71	13,05
120	vor der Behandlung (20/65)	50,04	50,00	10,03	18,37	0,73	13,09
131	vor der Behandlung (20/65)	49,82	49,73	10,00	18,07	0,73	11,89
132	vor der Behandlung (20/65)	49,97	49,98	10,02	18,27	0,73	12,36
133	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,04	10,01	18,03	0,72	12,48
134	vor der Behandlung (20/65)	50,05	50,07	10,02	17,72	0,71	12,65
135	vor der Behandlung (20/65)	50,02	50,02	10,05	18,00	0,72	12,71
136	vor der Behandlung (20/65)	50,00	50,02	10,03	18,28	0,73	12,91
137	vor der Behandlung (20/65)	49,96	49,92	10,01	18,29	0,73	12,76
138	vor der Behandlung (20/65)	49,98	49,94	9,99	18,18	0,73	12,85
139	vor der Behandlung (20/65)	49,98	50,04	10,04	17,86	0,71	12,26
140	vor der Behandlung (20/65)	49,82	49,91	10,06	18,25	0,73	11,89
Mittelwert		50,02	50,00	10,02	18,25	0,73	12,84
Standardabweichung		0,05	0,06	0,02	0,26	0,01	0,31

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Mass [g]	Dichte [g/cm ³]	Holzfeuchte [%]
71	vor der Behandlung (darr)	48,73	47,76	10,02	15,71	0,67	0,67
72	vor der Behandlung (darr)	48,79	47,62	9,98	16,36	0,71	0,71
73	vor der Behandlung (darr)	48,82	47,64	9,99	16,46	0,71	0,71
74	vor der Behandlung (darr)	48,84	47,50	9,90	16,40	0,71	0,71
75	vor der Behandlung (darr)	48,73	47,59	9,99	16,17	0,70	0,70
76	vor der Behandlung (darr)	48,81	47,61	10,01	16,36	0,70	0,70
77	vor der Behandlung (darr)	48,73	47,63	10,00	16,27	0,70	0,70
78	vor der Behandlung (darr)	48,85	47,60	9,98	16,12	0,69	0,69
79	vor der Behandlung (darr)	48,82	47,62	9,99	16,19	0,70	0,70
80	vor der Behandlung (darr)	48,87	47,65	9,98	16,08	0,69	0,69
91	vor der Behandlung (darr)	48,92	47,67	9,96	16,15	0,70	0,70
92	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,64	10,01	16,14	0,69	0,69
93	vor der Behandlung (darr)	49,02	47,76	9,97	15,74	0,67	0,67
94	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,64	10,00	16,33	0,70	0,70
95	vor der Behandlung (darr)	48,79	47,82	10,04	15,86	0,68	0,68
96	vor der Behandlung (darr)	48,80	47,67	10,00	16,32	0,70	0,70
97	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,67	9,99	16,38	0,70	0,70
98	vor der Behandlung (darr)	48,84	47,70	10,01	16,39	0,70	0,70
99	vor der Behandlung (darr)	48,82	47,59	9,98	16,36	0,71	0,71
100	vor der Behandlung (darr)	48,76	47,61	10,00	16,45	0,71	0,71
111	vor der Behandlung (darr)	48,77	47,97	10,03	16,01	0,68	0,68
112	vor der Behandlung (darr)	48,88	47,88	10,04	15,69	0,67	0,67
113	vor der Behandlung (darr)	48,88	47,66	9,99	16,36	0,70	0,70
114	vor der Behandlung (darr)	48,87	47,63	9,95	16,29	0,70	0,70
115	vor der Behandlung (darr)	48,85	47,60	10,01	16,41	0,70	0,70
116	vor der Behandlung (darr)	48,86	47,63	10,01	16,20	0,70	0,70
117	vor der Behandlung (darr)	48,86	47,64	9,97	16,34	0,70	0,70
118	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,61	9,98	16,22	0,70	0,70
119	vor der Behandlung (darr)	48,90	47,50	10,00	15,87	0,68	0,68
120	vor der Behandlung (darr)	48,84	47,50	10,00	16,25	0,70	0,70
131	vor der Behandlung (darr)	48,75	47,48	9,96	16,15	0,70	0,70
132	vor der Behandlung (darr)	48,80	47,71	9,98	16,26	0,70	0,70
133	vor der Behandlung (darr)	48,87	47,70	9,97	16,03	0,69	0,69
134	vor der Behandlung (darr)	48,88	47,72	9,98	15,73	0,68	0,68
135	vor der Behandlung (darr)	48,93	47,65	10,00	15,97	0,68	0,68
136	vor der Behandlung (darr)	48,86	47,58	9,98	16,19	0,70	0,70
137	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,60	9,97	16,22	0,70	0,70
138	vor der Behandlung (darr)	48,83	47,56	9,94	16,11	0,70	0,70
139	vor der Behandlung (darr)	48,90	47,67	9,99	15,91	0,68	0,68
140	vor der Behandlung (darr)	48,82	47,56	10,02	16,31	0,70	0,70
Mittelwert		48,84	47,65	9,99	16,17	0,70	0,70
Standardabweichung		0,06	0,09	0,03	0,22	0,01	0,01

Tabelle A-3: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Esche ohne Braunkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normalklima (20°C/65% r.L.)

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Masse [g]	Darrdichte [g/cm ³]
1	vor der Behandlung (darr)	49,35	48,80	10,01	14,45	0,60
2	vor der Behandlung (darr)	49,34	48,86	10,01	14,46	0,60
3	vor der Behandlung (darr)	49,36	48,81	10,00	14,63	0,60
4	vor der Behandlung (darr)	49,38	48,98	10,00	14,53	0,60
5	vor der Behandlung (darr)	49,33	48,83	10,00	14,53	0,60
6	vor der Behandlung (darr)	49,33	48,76	10,00	14,46	0,60
7	vor der Behandlung (darr)	49,32	48,77	10,00	14,45	0,60
8	vor der Behandlung (darr)	49,34	48,85	10,01	14,45	0,60
9	vor der Behandlung (darr)	49,34	48,77	10,00	14,51	0,61
10	vor der Behandlung (darr)	49,33	48,87	10,05	14,49	0,60
101	vor der Behandlung (darr)	49,34	48,86	10,04	14,48	0,60
102	vor der Behandlung (darr)	49,36	48,85	10,03	14,50	0,60
103	vor der Behandlung (darr)	49,35	48,86	10,03	14,34	0,59
104	vor der Behandlung (darr)	49,36	48,88	10,03	14,36	0,59
105	vor der Behandlung (darr)	49,32	48,84	10,04	14,36	0,60
106	vor der Behandlung (darr)	49,38	48,86	10,04	14,26	0,59
107	vor der Behandlung (darr)	49,33	48,80	10,01	14,53	0,60
108	vor der Behandlung (darr)	49,30	48,87	10,03	14,46	0,60
109	vor der Behandlung (darr)	49,27	48,84	9,98	14,53	0,61
110	vor der Behandlung (darr)	49,28	48,77	10,02	14,23	0,60
	Mittelwert	49,34	48,84	10,02	14,46	0,60
	Standardabweichung	0,03	0,05	0,02	0,10	0,01

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]	Holzfeuchte [%]
1	vor der Behandlung (20/65)	50,31	50,46	10,06	16,23	0,62	12,23
2	vor der Behandlung (20/65)	50,28	50,48	10,06	16,32	0,62	12,86
3	vor der Behandlung (20/65)	50,34	50,43	10,06	16,35	0,62	11,76
4	vor der Behandlung (20/65)	50,24	50,44	10,05	16,35	0,62	11,76
5	vor der Behandlung (20/65)	50,23	50,48	10,05	16,10	0,62	10,81
6	vor der Behandlung (20/65)	50,24	50,45	10,07	16,29	0,62	12,38
7	vor der Behandlung (20/65)	50,23	50,43	10,05	16,12	0,62	11,58
8	vor der Behandlung (20/65)	50,23	50,44	10,05	16,06	0,62	11,13
9	vor der Behandlung (20/65)	50,26	50,44	10,06	16,23	0,62	11,82
10	vor der Behandlung (20/65)	50,28	50,45	10,07	16,23	0,62	11,98
101	vor der Behandlung (20/65)	50,30	50,52	10,06	16,19	0,62	11,81
102	vor der Behandlung (20/65)	50,26	50,47	10,06	16,13	0,62	11,28
103	vor der Behandlung (20/65)	50,23	50,47	10,07	15,96	0,62	11,30
104	vor der Behandlung (20/65)	50,24	50,43	10,04	16,03	0,62	11,67
105	vor der Behandlung (20/65)	50,21	50,41	10,05	16,08	0,61	11,98
106	vor der Behandlung (20/65)	50,30	50,49	10,07	15,91	0,61	11,57
107	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,53	10,05	16,23	0,62	11,67
108	vor der Behandlung (20/65)	50,30	50,51	10,05	16,14	0,62	11,61
109	vor der Behandlung (20/65)	50,24	50,48	10,04	16,32	0,60	12,32
110	vor der Behandlung (20/65)	50,21	50,44	10,06	15,97	0,61	12,23
	Mittelwert	50,26	50,46	10,06	16,16	0,62	11,79
	Standardabweichung	0,04	0,03	0,01	0,13	0,01	0,48

Tabelle A-4: Rohdichte, Holzfeuchtigkeit und Darrdichte von Esche mit Braunkern vor der thermischen Behandlung nach Lagerung im Normalklima (20°C/65% r.L.)

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Masse [g]	Darrdichte [g/cm ³]
11	vor der Behandlung (darr)	49,29	48,82	9,99	14,56	0,61
12	vor der Behandlung (darr)	49,33	48,83	10,03	14,59	0,60
13	vor der Behandlung (darr)	49,29	48,82	9,98	14,57	0,61
14	vor der Behandlung (darr)	49,32	48,83	10,03	14,64	0,61
15	vor der Behandlung (darr)	49,27	48,82	10,01	14,62	0,61
16	vor der Behandlung (darr)	49,27	48,87	9,97	14,66	0,61
17	vor der Behandlung (darr)	49,27	48,82	10,03	14,77	0,61
18	vor der Behandlung (darr)	49,29	48,80	10,02	14,77	0,61
19	vor der Behandlung (darr)	49,29	48,83	10,03	14,64	0,61
20	vor der Behandlung (darr)	49,28	48,83	10,02	14,62	0,61
91	vor der Behandlung (darr)	49,18	48,89	10,01	14,61	0,63
92	vor der Behandlung (darr)	49,20	48,87	10,00	14,56	0,64
93	vor der Behandlung (darr)	49,34	48,79	10,06	14,84	0,61
94	vor der Behandlung (darr)	49,28	48,80	9,98	14,74	0,61
95	vor der Behandlung (darr)	49,30	48,86	10,00	14,78	0,61
96	vor der Behandlung (darr)	49,28	48,85	9,99	14,70	0,61
97	vor der Behandlung (darr)	49,28	48,84	10,00	14,74	0,61
98	vor der Behandlung (darr)	49,32	48,88	10,00	14,74	0,61
99	vor der Behandlung (darr)	49,30	48,84	10,00	14,68	0,61
100	vor der Behandlung (darr)	49,31	48,89	9,97	14,51	0,60
Mittelwert		49,28	48,84	10,01	14,67	0,61
Standardabweichung		0,04	0,03	0,02	0,09	0,01

PNr	Zeitpunkt der Messung	radial [mm]	tangential [mm]	longitudinal [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]	Holzfeuchte [%]
11	vor der Behandlung (20/65)	50,34	50,61	10,00	16,29	0,64	11,87
12	vor der Behandlung (20/65)	50,28	50,56	10,05	16,25	0,67	11,39
13	vor der Behandlung (20/65)	50,32	50,58	10,05	16,36	0,67	12,32
14	vor der Behandlung (20/65)	50,30	50,48	10,04	16,37	0,67	11,82
15	vor der Behandlung (20/65)	50,29	50,50	10,00	16,35	0,67	11,80
16	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,54	10,02	16,42	0,67	12,04
17	vor der Behandlung (20/65)	50,29	50,54	10,00	16,59	0,67	12,36
18	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,53	10,02	16,56	0,67	12,10
19	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,50	10,07	16,43	0,66	12,20
20	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,53	10,00	16,43	0,66	12,35
91	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,42	10,02	16,39	0,66	12,18
92	vor der Behandlung (20/65)	50,29	50,45	10,03	16,35	0,66	12,29
93	vor der Behandlung (20/65)	50,28	50,47	10,04	16,61	0,65	11,93
94	vor der Behandlung (20/65)	50,28	50,44	10,03	16,54	0,66	12,23
95	vor der Behandlung (20/65)	50,29	50,47	10,00	16,58	0,65	12,24
96	vor der Behandlung (20/65)	50,25	50,45	10,01	16,51	0,65	12,31
97	vor der Behandlung (20/65)	50,29	50,49	10,02	16,52	0,65	12,05
98	vor der Behandlung (20/65)	50,33	50,49	10,02	16,53	0,66	12,11
99	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,49	9,99	16,49	0,65	12,36
100	vor der Behandlung (20/65)	50,27	50,49	10,02	16,49	0,66	13,61
Mittelwert		50,28	50,50	10,02	16,45	0,66	12,18
Standardabweichung		0,02	0,05	0,02	0,10	0,01	0,42

Tabelle A-5: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern vor der thermischen Behandlung. RK = Rotkern, Normalklima 20°C/65% r.L. = (20/65)

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a*	b*	L* ¹	PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a* ¹	b* ¹	L* ¹	ΔL	ΔE
1	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.79	19.76	75.68	11	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.41	20.87	71.69	4.00	4.45
2	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.90	17.30	77.24	12	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	10.46	21.91	70.07	7.17	9.23
3	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.67	17.42	76.93	13	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.23	20.53	73.79	3.13	5.11
4	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.84	18.46	75.28	14	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.48	21.45	70.55	4.73	5.83
5	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.85	19.73	75.37	15	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.95	21.05	72.81	2.55	3.56
6	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.64	16.84	77.42	16	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.24	20.76	73.55	3.88	6.10
7	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.84	17.25	77.41	17	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.71	20.51	72.44	4.97	6.59
8	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.08	16.93	77.61	18	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.06	20.26	72.63	4.97	6.30
9	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.94	18.71	75.20	19	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.48	21.24	72.56	2.65	3.98
10	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.21	16.87	76.67	20	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.35	20.30	73.88	2.80	4.57
21	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.96	17.82	77.43	31	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.20	20.59	73.17	4.26	5.55
22	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.98	17.72	77.25	32	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.26	20.78	73.88	3.36	5.09
23	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.54	16.73	78.13	33	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.53	21.14	71.51	6.62	8.50
24	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.80	17.70	78.09	34	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.65	19.69	74.89	3.21	4.20
25	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.98	17.90	77.80	35	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.38	20.10	73.52	4.27	5.00
26	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.98	17.06	76.13	36	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.35	20.41	72.51	3.63	5.13
27	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.73	16.08	77.30	37	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.03	20.42	73.25	4.04	6.36
28	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.79	17.26	77.16	38	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.95	20.50	75.00	2.16	4.45
29	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.83	17.10	77.09	39	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.82	20.12	74.77	2.32	4.30
30	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.82	17.52	77.29	40	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.33	19.82	70.85	6.45	7.29
41	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.18	16.90	78.70	51	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.79	21.24	70.91	7.79	9.62
42	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.79	17.57	77.30	52	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.59	21.65	72.82	4.48	6.67
43	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.88	16.53	77.29	53	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.47	19.99	73.58	3.71	5.32
44	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.96	16.30	77.42	54	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.64	20.24	75.31	2.11	4.77
45	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.58	17.83	78.66	55	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.29	21.30	71.72	6.94	8.23
46	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.71	17.11	76.48	56	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.23	20.43	72.14	4.34	6.01
47	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.06	17.14	76.30	57	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.79	21.33	71.60	4.71	6.87
48	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.96	17.59	76.87	58	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.00	19.73	74.90	1.97	3.09
49	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.29	18.02	76.02	59	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.90	20.56	73.53	2.49	3.90
50	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.55	17.15	76.51	60	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	10.14	21.88	70.95	5.56	7.75
61	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.64	17.25	77.86	71	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.55	21.24	71.52	6.34	8.04
62	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.41	17.18	78.52	72	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	10.13	21.94	71.07	7.45	9.59
63	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.94	17.37	78.00	73	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.14	19.15	73.47	4.53	5.01
64	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.00	15.89	78.31	74	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.24	19.42	73.30	5.01	6.25
65	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.24	17.49	76.71	75	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.71	21.10	70.81	5.91	7.35
66	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.18	17.50	77.21	76	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.05	20.64	71.58	5.63	6.71
67	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.08	15.86	76.11	77	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.82	20.59	73.08	3.03	5.88
68	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.23	17.85	77.31	78	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.77	21.19	70.22	7.09	8.24
69	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.85	17.21	78.39	79	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.94	21.51	70.59	7.80	9.43
70	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.36	15.66	76.13	80	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.11	20.18	72.12	4.02	6.30
81	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.19	17.93	76.55	91	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.09	20.35	72.88	3.67	4.79
82	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.13	16.87	78.79	92	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.78	19.96	73.78	5.01	6.45
83	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.14	16.92	78.77	93	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.87	20.87	70.19	8.58	10.15
84	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.77	18.57	75.77	94	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.05	20.62	74.60	1.16	2.68
85	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.14	17.02	78.65	95	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.90	21.48	71.64	7.01	8.75
86	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.04	17.54	76.49	96	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.74	21.18	71.36	5.13	6.51
87	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.02	17.66	76.59	97	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.21	21.30	71.49	5.10	6.64
88	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.10	17.65	77.15	98	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.72	19.89	75.27	1.88	3.34
89	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.09	17.77	76.52	99	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.87	19.81	72.51	4.01	4.84
90	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.64	16.56	78.17	100	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.90	21.51	70.87	7.30	9.40
101	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.60	20.03	75.88	111	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	10.03	21.18	70.77	5.10	5.77
102	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.61	16.99	77.30	112	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.64	21.15	73.06	4.24	6.67
103	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.23	17.15	76.91	113	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.49	20.95	73.38	3.53	5.66
104	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.07	16.74	77.63	114	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.71	21.31	73.11	4.52	6.94
105	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.22	16.86	78.45	115	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	10.21	22.00	70.45	8.00	10.32
106	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	6.78	16.97	76.97	116	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.26	20.66	71.01	5.96	7.43
107	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.25	18.02	77.40	117	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.86	21.10	70.74	6.66	7.78
108	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.85	16.47	75.92	118	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.63	21.37	73.30	2.62	5.84
109	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.35	18.41	77.24	119	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	8.49	19.60	74.04	3.20	3.60
110	BU ohne RK	vor der Behandlung (20/65)	7.60	17.82	75.15	120	BU mit RK	vor der Behandlung (20/65)	9.31	20.77	71.80	3.36	4.79
	Mittelwert		7.00	17.39	77.11		Mittelwert		9.25	20.75	72.48	4.63	6.25
	Standartabweichung		0.44	0.85	0.96		Standartabweichung		0.57	0.67	1.44	1.79	1.87

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-6: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern nach der thermischen Behandlung bei 160° C. RK = Rotkern

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*
81	BU ohne RK	3h/160°C	6.47	15.76	68.21
82	BU ohne RK	3h/160°C	5.04	14.12	70.54
83	BU ohne RK	3h/160°C	5.04	14.06	70.60
84	BU ohne RK	3h/160°C	6.84	15.66	68.02
85	BU ohne RK	3h/160°C	5.17	14.38	70.73
86	BU ohne RK	3h/160°C	5.44	14.11	69.30
87	BU ohne RK	3h/160°C	5.59	14.24	68.30
88	BU ohne RK	3h/160°C	5.61	13.93	70.53
89	BU ohne RK	3h/160°C	5.52	14.01	67.36
90	BU ohne RK	3h/160°C	5.29	13.14	68.55
Mittelwert			5.60	14.34	69.21
Standartabweichung			0.60	0.79	1.29

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*	ΔL	ΔE
91	BU mit RK	3h/160°C	7.77	17.51	67.48	0.72	2.30
92	BU mit RK	3h/160°C	8.14	17.41	68.45	2.09	4.99
93	BU mit RK	3h/160°C	8.39	17.44	65.52	5.08	6.96
94	BU mit RK	3h/160°C	8.17	17.24	68.32	0.30	2.09
95	BU mit RK	3h/160°C	7.79	17.94	66.26	4.47	6.29
96	BU mit RK	3h/160°C	7.75	18.07	66.65	2.66	5.29
97	BU mit RK	3h/160°C	7.82	17.39	66.37	1.93	4.32
98	BU mit RK	3h/160°C	7.84	16.90	66.75	3.78	5.30
99	BU mit RK	3h/160°C	7.59	16.81	67.59	0.23	3.49
100	BU mit RK	3h/160°C	8.51	17.91	65.73	2.82	6.41
Mittelwert			7.98	17.46	66.91	2.41	4.75
Standartabweichung			0.31	0.42	1.02	1.70	1.68

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*
81	BU ohne RK	6h/160°C	6.70	15.62	64.05
82	BU ohne RK	6h/160°C	4.61	13.87	66.73
83	BU ohne RK	6h/160°C	4.58	13.85	67.02
84	BU ohne RK	6h/160°C	7.01	15.05	63.25
85	BU ohne RK	6h/160°C	4.64	14.32	66.55
86	BU ohne RK	6h/160°C	5.14	13.98	64.67
87	BU ohne RK	6h/160°C	5.20	14.03	65.02
88	BU ohne RK	6h/160°C	5.70	14.44	64.54
89	BU ohne RK	6h/160°C	5.22	13.82	64.27
90	BU ohne RK	6h/160°C	4.88	13.04	65.16
Mittelwert			5.36	14.20	65.12
Standartabweichung			0.86	0.72	1.26

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*	ΔL	ΔE
91	BU mit RK	6h/160°C	7.98	17.55	64.60	0.55	2.38
92	BU mit RK	6h/160°C	8.27	17.04	64.73	2.01	5.24
93	BU mit RK	6h/160°C	8.22	16.71	61.97	5.05	6.86
94	BU mit RK	6h/160°C	8.33	16.82	64.40	1.15	2.49
95	BU mit RK	6h/160°C	7.70	17.46	63.55	3.00	5.32
96	BU mit RK	6h/160°C	7.68	17.47	63.42	1.25	4.50
97	BU mit RK	6h/160°C	7.55	16.44	62.71	2.31	4.08
98	BU mit RK	6h/160°C	7.99	16.31	64.66	0.12	2.97
99	BU mit RK	6h/160°C	7.49	16.38	63.87	0.39	3.44
100	BU mit RK	6h/160°C	8.35	17.14	61.83	3.33	6.33
Mittelwert			7.96	16.93	63.57	1.92	4.36
Standartabweichung			0.33	0.47	1.09	1.55	1.57

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*
81	BU ohne RK	12h/160°C	6.78	16.61	60.87
82	BU ohne RK	12h/160°C	4.47	15.74	63.38
83	BU ohne RK	12h/160°C	4.47	15.47	63.99
84	BU ohne RK	12h/160°C	6.93	15.70	59.41
85	BU ohne RK	12h/160°C	4.59	15.91	63.48
86	BU ohne RK	12h/160°C	4.89	15.34	61.83
87	BU ohne RK	12h/160°C	4.92	15.14	62.17
88	BU ohne RK	12h/160°C	5.52	15.47	61.50
89	BU ohne RK	12h/160°C	4.93	15.09	61.24
90	BU ohne RK	12h/160°C	4.40	14.58	62.57
Mittelwert			5.19	15.51	62.04
Standartabweichung			0.94	0.54	1.38

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*	ΔL	ΔE
91	BU mit RK	12h/160°C	8.57	18.31	61.68	0.81	2.59
92	BU mit RK	12h/160°C	8.67	17.47	61.80	1.58	4.82
93	BU mit RK	12h/160°C	8.50	16.98	59.30	4.69	6.37
94	BU mit RK	12h/160°C	8.74	17.27	61.26	1.85	3.03
95	BU mit RK	12h/160°C	8.00	17.91	61.24	2.24	4.54
96	BU mit RK	12h/160°C	7.98	17.79	61.35	0.48	3.97
97	BU mit RK	12h/160°C	7.88	16.79	60.55	1.61	3.76
98	BU mit RK	12h/160°C	8.45	16.99	61.88	0.38	3.32
99	BU mit RK	12h/160°C	7.86	17.14	61.57	0.34	3.59
100	BU mit RK	12h/160°C	8.71	17.65	60.05	2.52	5.86
Mittelwert			8.34	17.43	61.07	1.65	4.18
Standartabweichung			0.36	0.48	0.84	1.33	1.22

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*
81	BU ohne RK	24h/160°C	7.87	18.39	57.53
82	BU ohne RK	24h/160°C	5.94	18.17	60.03
83	BU ohne RK	24h/160°C	6.02	18.14	60.10
84	BU ohne RK	24h/160°C	7.95	17.29	55.88
85	BU ohne RK	24h/160°C	6.07	18.47	59.87
86	BU ohne RK	24h/160°C	6.02	17.44	58.76
87	BU ohne RK	24h/160°C	6.03	17.26	58.90
88	BU ohne RK	24h/160°C	6.69	17.54	57.96
89	BU ohne RK	24h/160°C	6.13	17.23	58.22
90	BU ohne RK	24h/160°C	5.58	17.17	59.21
Mittelwert			6.43	17.71	58.65
Standartabweichung			0.82	0.52	1.31

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^*	b^*	L^*	ΔL	ΔE
91	BU mit RK	24h/160°C	9.58	19.74	58.62	1.10	2.43
92	BU mit RK	24h/160°C	9.51	18.82	58.65	1.39	3.89
93	BU mit RK	24h/160°C	9.23	18.02	56.41	3.70	4.89
94	BU mit RK	24h/160°C	9.62	18.54	58.20	2.33	3.13
95	BU mit RK	24h/160°C	8.87	18.97	58.53	1.34	3.15
96	BU mit RK	24h/160°C	8.75	18.93	58.69	0.06	3.11
97	BU mit RK	24h/160°C	8.62	17.95	57.80	1.10	2.89
98	BU mit RK	24h/160°C	9.22	18.39	58.77	0.81	2.79
99	BU mit RK	24h/160°C	8.69	18.54	58.77	0.55	2.93
100	BU mit RK	24h/160°C	9.48	18.79	57.28	1.93	4.65
Mittelwert			9.16	18.67	58.17	1.43	3.39
Standartabweichung			0.39	0.51	0.79	1.02	0.82

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-7: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern nach der thermischen Behandlung bei 180° C. RK = Rotkern

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
61	BU ohne RK	3h/180°C	4.21	14.63	60.54		
62	BU ohne RK	3h/180°C	4.30	14.06	62.52		
63	BU ohne RK	3h/180°C	5.04	15.17	60.63		
64	BU ohne RK	3h/180°C	4.04	13.98	62.47		
65	BU ohne RK	3h/180°C	4.92	14.97	60.43		
66	BU ohne RK	3h/180°C	4.53	15.22	59.16		
67	BU ohne RK	3h/180°C	3.60	14.53	64.44		
68	BU ohne RK	3h/180°C	5.17	15.15	59.18		
69	BU ohne RK	3h/180°C	4.75	14.21	60.04		
70	BU ohne RK	3h/180°C	4.99	14.53	60.59		
		Mittelwert	4.55	14.64	61.00		
		Standartabweichung	0.51	0.47	1.66		
71	BU mit RK	3h/180°C	8.37	17.49	59.07	1.47	5.26
72	BU mit RK	3h/180°C	8.93	17.30	59.24	3.29	6.54
73	BU mit RK	3h/180°C	6.87	16.13	63.07	2.45	3.20
74	BU mit RK	3h/180°C	7.23	15.87	60.65	1.82	4.13
75	BU mit RK	3h/180°C	8.58	16.81	58.73	1.70	4.44
76	BU mit RK	3h/180°C	8.12	18.45	57.45	1.71	5.12
77	BU mit RK	3h/180°C	8.07	16.66	60.87	3.57	6.11
78	BU mit RK	3h/180°C	8.46	16.80	57.69	1.49	3.97
79	BU mit RK	3h/180°C	8.47	17.98	58.46	1.58	5.53
80	BU mit RK	3h/180°C	8.96	16.71	60.87	0.27	4.54
		Mittelwert	8.21	17.02	59.61	1.93	4.88
		Standartabweichung	0.68	0.80	1.74	0.95	1.02
42	BU ohne RK	6h/180°C	6.32	17.51	58.98	0.96	3.43
43	BU ohne RK	6h/180°C	5.33	16.26	58.64	0.85	3.92
44	BU ohne RK	6h/180°C	5.77	16.86	61.50	1.83	5.01
45	BU ohne RK	6h/180°C	6.09	17.03	59.26	1.32	4.44
46	BU ohne RK	6h/180°C	6.17	17.49	60.22	2.46	4.86
47	BU ohne RK	6h/180°C	6.53	17.09	59.92	2.26	4.72
48	BU ohne RK	6h/180°C	6.05	17.56	59.84	2.86	4.18
49	BU ohne RK	6h/180°C	6.49	17.20	58.41	2.28	4.20
50	BU ohne RK	6h/180°C	6.68	15.58	57.97	0.54	4.82
		Mittelwert	6.16	16.95	59.41	1.71	4.40
		Standartabweichung	0.42	0.66	1.08	0.82	0.51
52	BU mit RK	6h/180°C	9.56	18.12	58.02	0.96	3.43
53	BU mit RK	6h/180°C	8.81	17.83	59.50	0.85	3.92
54	BU mit RK	6h/180°C	10.12	18.55	59.67	1.83	5.01
55	BU mit RK	6h/180°C	10.10	18.39	57.93	1.32	4.44
56	BU mit RK	6h/180°C	10.22	18.54	57.77	2.46	4.86
57	BU mit RK	6h/180°C	10.03	19.31	57.66	2.26	4.72
58	BU mit RK	6h/180°C	8.94	18.55	62.70	2.86	4.18
59	BU mit RK	6h/180°C	9.23	19.42	60.69	2.28	4.20
60	BU mit RK	6h/180°C	10.31	18.71	57.43	0.54	4.82
		Mittelwert	9.70	18.60	59.04	1.71	4.40
		Standartabweichung	0.58	0.51	1.77	0.82	0.51
61	BU ohne RK	12h/180°C	7.56	17.89	50.20	0.87	3.13
62	BU ohne RK	12h/180°C	7.32	17.23	51.34	1.55	3.80
63	BU ohne RK	12h/180°C	7.12	17.25	49.96	3.64	5.52
64	BU ohne RK	12h/180°C	6.23	16.86	52.29	1.41	4.21
65	BU ohne RK	12h/180°C	7.86	17.25	50.88	1.59	3.02
66	BU ohne RK	12h/180°C	6.53	16.00	49.04	1.65	4.93
67	BU ohne RK	12h/180°C	7.15	16.98	53.17	2.62	4.76
68	BU ohne RK	12h/180°C	7.36	16.23	49.37	0.73	3.01
69	BU ohne RK	12h/180°C	7.25	16.56	49.36	0.69	3.78
70	BU ohne RK	12h/180°C	6.24	17.45	52.16	0.66	4.27
		Mittelwert	7.06	16.97	50.78	1.54	4.04
		Standartabweichung	0.55	0.57	1.42	0.96	0.86
71	BU mit RK	12h/180°C	10.25	19.23	49.33	0.87	3.13
72	BU mit RK	12h/180°C	10.34	18.96	49.80	1.55	3.80
73	BU mit RK	12h/180°C	10.56	19.56	53.60	3.64	5.52
74	BU mit RK	12h/180°C	9.86	18.47	53.70	1.41	4.21
75	BU mit RK	12h/180°C	10.01	18.65	49.29	1.59	3.02
76	BU mit RK	12h/180°C	9.88	19.23	50.69	1.65	4.93
77	BU mit RK	12h/180°C	10.85	18.41	50.55	2.62	4.76
78	BU mit RK	12h/180°C	9.12	18.56	48.64	0.73	3.01
79	BU mit RK	12h/180°C	9.32	19.65	48.67	0.69	3.78
80	BU mit RK	12h/180°C	9.81	19.69	51.50	0.66	4.27
		Mittelwert	10.00	19.04	50.58	1.54	4.04
		Standartabweichung	0.53	0.50	1.86	0.96	0.86
101	BU ohne RK	24h/180°C	8.63	12.07	41.57	0.42	3.31
102	BU ohne RK	24h/180°C	8.59	13.94	41.71	0.62	1.08
103	BU ohne RK	24h/180°C	8.44	13.94	42.05	0.07	1.15
104	BU ohne RK	24h/180°C	8.40	13.83	42.05	0.88	1.34
105	BU ohne RK	24h/180°C	9.02	14.94	41.07	0.10	1.07
106	BU ohne RK	24h/180°C	8.90	13.96	41.24	0.67	1.15
107	BU ohne RK	24h/180°C	8.34	13.57	41.38	0.60	1.23
108	BU ohne RK	24h/180°C	8.29	14.97	41.26	0.48	1.46
109	BU ohne RK	24h/180°C	8.36	12.67	39.63	0.36	4.87
110	BU ohne RK	24h/180°C	8.47	13.27	39.83	0.30	1.77
		Mittelwert	8.54	13.71	41.18	0.45	1.84
		Standartabweichung	0.24	0.90	0.83	0.26	1.26
111	BU mit RK	24h/180°C	9.27	15.29	41.99	0.42	3.31
112	BU mit RK	24h/180°C	9.24	14.54	42.33	0.62	1.08
113	BU mit RK	24h/180°C	9.40	14.58	42.11	0.07	1.15
114	BU mit RK	24h/180°C	9.40	14.03	41.17	0.88	1.34
115	BU mit RK	24h/180°C	9.03	13.87	40.97	0.10	1.07
116	BU mit RK	24h/180°C	9.48	14.69	40.57	0.67	1.15
117	BU mit RK	24h/180°C	9.04	14.38	41.98	0.60	1.23
118	BU mit RK	24h/180°C	9.29	14.03	41.74	0.48	1.46
119	BU mit RK	24h/180°C	9.32	17.43	39.99	0.36	4.87
120	BU mit RK	24h/180°C	8.86	14.97	40.13	0.30	1.77
		Mittelwert	9.23	14.78	41.30	0.45	1.84
		Standartabweichung	0.20	1.03	0.86	0.26	1.26

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-8: a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern vor der thermischen Behandlung. BK = Braunkern, Normklima 20°C/65% r.L. = (20/65)

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a* ¹⁾	b* ¹⁾	L* ¹⁾	PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a* ¹⁾	b* ¹⁾	L* ¹⁾	ΔL	ΔE
1	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.49	18.45	81.54	11	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.67	21.69	73.69	7.85	9.07
2	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.78	19.31	81.70	12	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.73	21.60	74.57	7.13	8.05
3	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.39	19.21	82.71	13	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.84	21.48	73.96	8.75	9.68
4	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.01	18.77	83.00	14	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.84	22.20	74.58	8.42	9.87
5	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.39	18.22	82.35	15	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.28	20.82	75.60	6.75	7.79
6	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.81	17.83	83.43	16	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.90	21.99	74.22	9.21	10.90
7	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.75	17.93	83.49	17	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.32	20.54	75.55	7.94	9.09
8	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.83	17.66	83.80	18	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.10	22.19	74.07	9.73	11.55
21	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.63	17.04	83.51	31	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.07	22.25	73.71	9.80	11.95
22	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.07	16.39	82.81	32	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.98	21.19	73.34	9.47	11.31
23	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.45	18.03	82.66	33	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.91	20.83	73.21	9.45	10.45
24	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.26	16.99	82.42	34	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.11	21.17	72.98	9.44	11.02
25	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.75	17.35	83.42	35	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.84	21.18	74.37	9.05	10.64
26	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.19	16.85	82.24	36	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.44	21.25	75.38	6.86	8.77
27	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.85	17.76	83.22	37	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.82	21.25	74.42	8.80	10.27
28	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.36	18.20	83.01	38	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.02	22.15	74.17	8.84	10.35
29	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.63	16.24	81.94	39	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.89	21.88	73.30	8.64	10.82
41	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	5.11	17.25	81.88	51	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.28	19.98	73.71	8.17	8.88
42	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.87	16.81	81.85	52	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.20	20.23	74.02	7.83	8.86
43	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.81	18.08	81.76	53	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.19	19.93	73.95	7.81	8.37
44	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.69	17.74	81.93	54	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.09	22.12	74.19	7.74	9.52
45	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.78	17.97	81.74	55	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.88	21.00	73.47	8.27	9.34
46	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.20	16.64	83.18	56	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.21	20.32	74.39	8.79	9.99
47	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.02	16.62	82.96	57	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.79	20.30	74.17	8.79	10.25
48	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.15	17.00	83.00	58	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.78	20.14	73.89	9.11	10.30
49	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.06	16.80	83.19	59	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.96	21.34	73.50	9.69	11.39
50	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.13	17.14	82.86	60	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.32	21.44	72.59	10.27	11.90
61	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.57	16.87	83.03	71	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.31	20.48	74.32	8.71	9.82
62	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.57	16.54	82.45	72	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.27	20.47	74.27	8.18	9.47
63	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.40	16.87	82.32	73	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.17	20.23	73.96	8.36	9.43
64	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.24	16.93	83.87	74	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.41	20.72	72.97	10.90	12.27
65	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.71	18.45	83.89	75	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.27	20.43	74.23	9.66	10.48
66	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.69	17.17	82.38	76	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.32	20.68	74.03	8.35	9.43
67	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.73	16.57	81.76	77	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.28	20.77	74.38	7.38	8.87
68	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	5.19	16.85	80.31	78	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.25	20.47	74.60	5.71	7.07
69	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.37	17.31	83.84	79	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.41	20.11	72.99	10.85	11.91
70	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.00	18.95	83.52	80	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.16	19.68	72.98	10.54	11.03
81	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.37	17.71	81.71	91	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.72	20.72	73.35	8.36	9.50
82	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.36	17.77	81.73	92	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.66	20.82	73.96	7.77	8.98
83	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.26	17.45	81.85	93	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.91	21.61	73.67	8.18	9.88
84	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.30	17.34	82.11	94	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.98	21.80	73.83	8.28	10.10
85	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.19	17.27	82.24	95	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.10	21.38	72.79	9.45	11.02
86	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.52	17.92	81.33	96	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.82	21.18	73.87	7.46	8.78
87	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.27	17.08	81.93	97	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.99	21.57	73.44	8.49	10.30
88	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.26	17.24	81.74	98	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.07	21.60	73.16	8.58	10.35
89	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.22	17.12	81.87	99	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.97	21.38	73.29	8.58	10.29
90	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.29	17.23	81.98	100	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.99	21.50	73.37	8.61	10.30
101	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.95	18.55	83.66	111	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.20	21.30	73.65	10.01	11.22
102	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.88	18.89	83.90	112	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.73	20.36	75.03	8.87	9.78
103	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.80	18.39	83.98	113	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.41	20.65	72.76	11.22	12.34
104	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	3.67	17.57	84.48	114	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.61	21.23	72.57	11.91	13.40
105	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.11	18.37	83.69	115	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.44	21.73	74.08	9.61	11.06
106	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.34	17.05	81.57	116	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.93	21.27	74.91	6.66	8.66
107	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.17	17.14	81.91	117	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.28	21.51	74.42	7.49	9.60
108	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.11	16.74	82.33	118	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.54	21.77	73.59	8.74	11.01
109	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.27	17.18	81.91	119	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	8.11	21.31	75.11	6.80	8.83
110	ES ohne BK	vor der Behandlung (20/65)	4.36	17.59	81.74	120	ES mit BK	vor der Behandlung (20/65)	7.77	21.01	75.67	6.07	7.76
		Mittelwert	4.24	17.52	82.57			Mittelwert	7.78	21.09	73.93	8.64	10.06
		Standardabweichung	0.39	0.74	0.87			Standardabweichung	0.38	0.65	0.74	1.24	1.26

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-9: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 160° C. BK = Braunkern

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾						
81	ES ohne BK	6h/160°C	7.25	25.74	70.32						
82	ES ohne BK	6h/160°C	7.05	25.44	70.79						
83	ES ohne BK	6h/160°C	7.95	25.37	71.27						
84	ES ohne BK	6h/160°C	7.02	24.96	71.74						
85	ES ohne BK	6h/160°C	6.87	25.27	71.89						
86	ES ohne BK	6h/160°C	7.66	26.08	69.62						
87	ES ohne BK	6h/160°C	7.02	24.55	71.23						
88	ES ohne BK	6h/160°C	7.02	25.68	70.72						
89	ES ohne BK	6h/160°C	7.36	24.88	71.36						
90	ES ohne BK	6h/160°C	7.27	24.82	72.08						
		Mittelwert	7.25	25.28	71.10						
		Standartabweichung	0.34	0.48	0.76						

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
91	ES mit BK	6h/160°C	9.25	29.18	68.79	1.53	3.77
92	ES mit BK	6h/160°C	9.25	29.26	69.27	1.52	4.11
93	ES mit BK	6h/160°C	9.26	30.90	68.33	2.94	6.26
94	ES mit BK	6h/160°C	9.26	30.31	69.51	2.24	5.81
95	ES mit BK	6h/160°C	9.25	29.37	69.31	2.58	4.84
96	ES mit BK	6h/160°C	9.25	29.68	69.24	0.38	3.63
97	ES mit BK	6h/160°C	9.26	30.29	68.91	2.32	6.19
98	ES mit BK	6h/160°C	9.26	30.26	69.04	1.69	4.87
99	ES mit BK	6h/160°C	9.26	29.71	69.39	1.97	5.22
100	ES mit BK	6h/160°C	9.26	29.84	69.28	2.80	5.75
		Mittelwert	9.26	29.88	69.11	2.00	5.43
		Standartabweichung	0.00	0.55	0.35	0.76	0.91

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾						
81	ES ohne BK	12h/160°C	7.16	20.32	64.46						
82	ES ohne BK	12h/160°C	7.00	20.25	65.27						
83	ES ohne BK	12h/160°C	6.93	20.38	65.29						
84	ES ohne BK	12h/160°C	6.86	20.13	65.87						
85	ES ohne BK	12h/160°C	7.00	20.30	65.47						
86	ES ohne BK	12h/160°C	7.19	20.47	63.58						
87	ES ohne BK	12h/160°C	6.64	20.00	65.25						
88	ES ohne BK	12h/160°C	6.93	20.78	64.80						
89	ES ohne BK	12h/160°C	6.76	20.21	65.20						
90	ES ohne BK	12h/160°C	6.82	20.23	65.73						
		Mittelwert	6.93	20.30	65.09						
		Standartabweichung	0.17	0.21	0.67						

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
91	ES mit BK	12h/160°C	8.05	22.55	64.56	0.11	2.40
92	ES mit BK	12h/160°C	8.20	22.68	64.65	0.62	2.78
93	ES mit BK	12h/160°C	8.78	23.27	63.47	1.82	3.89
94	ES mit BK	12h/160°C	8.66	23.25	64.22	1.65	3.95
95	ES mit BK	12h/160°C	8.33	22.63	64.38	1.09	2.89
96	ES mit BK	12h/160°C	8.35	22.90	64.44	0.86	2.83
97	ES mit BK	12h/160°C	8.59	23.15	64.07	1.18	3.89
98	ES mit BK	12h/160°C	8.63	23.14	64.03	0.77	3.01
99	ES mit BK	12h/160°C	8.50	22.89	64.49	0.71	3.27
100	ES mit BK	12h/160°C	8.47	22.94	64.36	1.37	3.46
		Mittelwert	8.45	22.94	64.27	1.02	3.24
		Standartabweichung	0.22	0.26	0.35	0.51	0.54

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾						
81	ES ohne BK	24h/160°C	8.49	21.34	59.87						
82	ES ohne BK	24h/160°C	8.42	21.44	60.16						
83	ES ohne BK	24h/160°C	8.47	21.62	60.27						
84	ES ohne BK	24h/160°C	7.86	21.37	63.00						
85	ES ohne BK	24h/160°C	8.03	21.71	62.22						
86	ES ohne BK	24h/160°C	8.55	21.49	58.84						
87	ES ohne BK	24h/160°C	8.04	21.17	60.55						
88	ES ohne BK	24h/160°C	8.47	21.98	59.81						
89	ES ohne BK	24h/160°C	8.17	21.41	60.46						
90	ES ohne BK	24h/160°C	8.39	21.59	60.73						
		Mittelwert	8.29	21.51	60.59						
		Standartabweichung	0.24	0.23	1.20						

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
91	ES mit BK	24h/160°C	9.69	23.67	60.33	0.46	2.66
92	ES mit BK	24h/160°C	9.95	23.65	59.76	0.40	2.72
93	ES mit BK	24h/160°C	10.49	23.94	58.48	1.79	3.56
94	ES mit BK	24h/160°C	10.38	24.01	59.15	3.85	5.31
95	ES mit BK	24h/160°C	10.00	23.70	59.64	2.59	3.81
96	ES mit BK	24h/160°C	9.92	23.83	60.20	1.36	3.03
97	ES mit BK	24h/160°C	10.13	23.99	59.71	0.84	3.61
98	ES mit BK	24h/160°C	10.19	23.93	59.47	0.34	2.62
99	ES mit BK	24h/160°C	10.14	23.83	59.79	0.67	3.19
100	ES mit BK	24h/160°C	10.18	23.81	59.36	1.37	3.17
		Mittelwert	10.11	23.84	59.59	1.37	3.37
		Standartabweichung	0.23	0.13	0.53	1.13	0.80

1) Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-10: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 180° C. BK = Braunkern

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾
101	ES ohne BK	6h/180°C	8.37	22.10	58.59
102	ES ohne BK	6h/180°C	8.38	21.75	58.08
103	ES ohne BK	6h/180°C	8.47	21.99	57.65
104	ES ohne BK	6h/180°C	8.24	22.20	59.42
105	ES ohne BK	6h/180°C	8.05	21.64	59.74
106	ES ohne BK	6h/180°C	7.20	19.10	56.30
107	ES ohne BK	6h/180°C	7.28	19.22	55.90
108	ES ohne BK	6h/180°C	7.25	19.45	56.11
109	ES ohne BK	6h/180°C	7.42	19.02	55.27
110	ES ohne BK	6h/180°C	7.56	19.06	55.56
Mittelwert			7.82	20.55	57.26
Standartabweichung			0.53	1.47	1.64

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
111	ES mit BK	6h/180°C	9.78	22.64	55.79	2.79	3.17
112	ES mit BK	6h/180°C	9.84	22.68	56.50	1.57	2.34
113	ES mit BK	6h/180°C	9.43	22.19	56.31	1.35	1.66
114	ES mit BK	6h/180°C	9.48	22.36	56.69	2.73	3.00
115	ES mit BK	6h/180°C	9.30	23.04	58.63	1.11	2.18
116	ES mit BK	6h/180°C	10.24	23.74	56.19	0.11	5.55
117	ES mit BK	6h/180°C	10.10	23.38	56.48	0.58	5.06
118	ES mit BK	6h/180°C	9.96	23.19	56.54	0.43	4.64
119	ES mit BK	6h/180°C	9.64	23.14	57.77	2.50	5.31
120	ES mit BK	6h/180°C	9.58	23.31	57.93	2.37	5.27
Mittelwert			9.73	22.97	56.88	1.55	3.11
Standartabweichung			0.30	0.49	0.91	1.00	1.49

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾
102	ES ohne BK	12h/180°C	9.87	21.18	51.04
103	ES ohne BK	12h/180°C	10.16	21.18	50.34
104	ES ohne BK	12h/180°C	9.99	21.79	52.15
105	ES ohne BK	12h/180°C	9.97	21.65	52.84
106	ES ohne BK	12h/180°C	9.81	18.67	49.78
107	ES ohne BK	12h/180°C	9.82	18.61	49.36
108	ES ohne BK	12h/180°C	9.95	20.12	49.15
109	ES ohne BK	12h/180°C	9.95	20.36	48.86
110	ES ohne BK	12h/180°C	9.81	18.50	49.28
Mittelwert			9.93	20.23	50.31
Standartabweichung			0.11	1.34	1.41

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
112	ES mit BK	12h/180°C	10.89	21.66	49.59	1.45	1.84
113	ES mit BK	12h/180°C	10.51	20.36	49.63	0.71	1.14
114	ES mit BK	12h/180°C	10.59	20.60	49.92	2.23	2.60
115	ES mit BK	12h/180°C	10.59	21.49	51.62	1.23	1.38
116	ES mit BK	12h/180°C	11.29	21.30	49.05	0.73	3.11
117	ES mit BK	12h/180°C	11.16	21.07	49.33	0.02	2.80
118	ES mit BK	12h/180°C	11.04	21.14	49.50	0.35	1.53
119	ES mit BK	12h/180°C	10.84	21.38	50.61	1.76	2.21
120	ES mit BK	12h/180°C	10.84	21.44	50.70	1.42	3.43
Mittelwert			10.86	21.16	49.99	1.10	2.23
Standartabweichung			0.27	0.43	0.82	0.70	0.81

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾
103	ES ohne BK	24h/180°C	9.74	14.56	41.34
104	ES ohne BK	24h/180°C	9.85	14.56	42.59
105	ES ohne BK	24h/180°C	9.97	14.56	43.70
106	ES ohne BK	24h/180°C	8.75	14.65	42.16
107	ES ohne BK	24h/180°C	8.76	14.35	41.61
108	ES ohne BK	24h/180°C	8.71	14.47	41.79
109	ES ohne BK	24h/180°C	8.73	14.39	41.75
110	ES ohne BK	24h/180°C	8.86	14.65	42.03
Mittelwert			9.17	14.53	42.12
Standartabweichung			0.57	0.11	0.74

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
113	ES mit BK	24h/180°C	9.68	15.69	42.14	0.80	1.38
114	ES mit BK	24h/180°C	9.79	15.67	41.93	0.66	1.29
115	ES mit BK	24h/180°C	10.26	16.59	43.24	0.47	2.09
116	ES mit BK	24h/180°C	10.29	15.57	40.91	1.25	2.19
117	ES mit BK	24h/180°C	10.37	15.57	41.24	0.37	2.05
118	ES mit BK	24h/180°C	10.04	15.57	41.05	0.74	1.87
119	ES mit BK	24h/180°C	10.46	15.68	41.59	0.16	2.17
120	ES mit BK	24h/180°C	10.26	16.08	42.05	0.02	2.00
Mittelwert			10.14	15.80	41.77	0.56	1.88
Standartabweichung			0.28	0.36	0.75	0.39	0.35

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-11: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern nach der thermischen Behandlung bei 200° C. BK = Braunkern

PrNr	Holzart	Zeitpunkt der Messung	a^* ¹⁾	b^* ¹⁾	L^* ¹⁾	ΔL	ΔE
21	ES ohne BK	6h/200°C	6.79	8.64	34.69		
22	ES ohne BK	6h/200°C	6.18	7.83	34.73		
23	ES ohne BK	6h/200°C	4.95	6.12	33.19		
24	ES ohne BK	6h/200°C	6.48	8.23	34.97		
25	ES ohne BK	6h/200°C	6.68	8.56	34.46		
26	ES ohne BK	6h/200°C	6.96	8.81	35.10		
27	ES ohne BK	6h/200°C	7.64	10.09	35.57		
28	ES ohne BK	6h/200°C	6.13	7.83	34.41		
29	ES ohne BK	6h/200°C	4.71	5.71	32.61		
		Mittelwert	6.28	7.98	34.41		
		Standartabweichung	0.94	1.35	0.94		
31	ES mit BK	6h/200°C	5.43	6.89	33.03	1.66	2.77
32	ES mit BK	6h/200°C	6.17	7.97	33.71	1.02	1.03
33	ES mit BK	6h/200°C	7.09	9.27	34.73	1.54	4.11
34	ES mit BK	6h/200°C	7.15	9.31	34.75	0.22	1.29
35	ES mit BK	6h/200°C	8.45	11.59	36.68	2.22	4.15
36	ES mit BK	6h/200°C	7.57	9.95	35.23	0.13	1.30
37	ES mit BK	6h/200°C	7.40	9.96	35.63	0.06	0.28
38	ES mit BK	6h/200°C	6.98	9.37	34.81	0.40	1.80
39	ES mit BK	6h/200°C	7.63	10.36	35.73	3.12	6.32
		Mittelwert	7.10	9.41	34.92	1.15	2.56
		Standartabweichung	0.87	1.36	1.09	1.07	1.95
45	ES ohne BK	12h/200°C	5.20	5.29	30.95		
46	ES ohne BK	12h/200°C	5.30	5.43	33.13		
47	ES ohne BK	12h/200°C	5.31	6.34	33.68		
48	ES ohne BK	12h/200°C	5.35	6.56	33.65		
49	ES ohne BK	12h/200°C	5.38	6.45	33.63		
50	ES ohne BK	12h/200°C	5.35	6.12	33.68		
		Mittelwert	5.32	6.03	33.12		
		Standartabweichung	0.06	0.54	1.08		
52	ES mit BK	12h/200°C	6.20	5.99	32.50	1.55	1.97
53	ES mit BK	12h/200°C	5.46	5.60	32.24	0.89	0.92
54	ES mit BK	12h/200°C	5.52	6.53	32.85	0.83	0.88
58	ES mit BK	12h/200°C	5.89	7.50	32.79	0.86	1.38
59	ES mit BK	12h/200°C	6.80	6.99	32.74	0.89	1.76
60	ES mit BK	12h/200°C	6.18	7.45	32.67	1.01	1.86
		Mittelwert	6.01	6.68	32.63	1.01	1.46
		Standartabweichung	0.50	0.78	0.23	0.27	0.48
61	ES ohne BK	24h/200°C	4.33	3.94	32.96		
62	ES ohne BK	24h/200°C	4.28	4.21	32.34		
63	ES ohne BK	24h/200°C	3.75	3.20	31.50		
64	ES ohne BK	24h/200°C	4.08	3.79	31.89		
65	ES ohne BK	24h/200°C	3.77	2.95	32.01		
66	ES ohne BK	24h/200°C	3.60	2.80	33.14		
67	ES ohne BK	24h/200°C	4.07	3.30	33.27		
68	ES ohne BK	24h/200°C	4.45	4.65	32.65		
		Mittelwert	4.04	3.60	32.47		
		Standartabweichung	0.31	0.65	0.64		
71	ES mit BK	24h/200°C	4.70	4.33	31.90	1.07	1.19
72	ES mit BK	24h/200°C	4.55	4.04	32.18	0.16	0.36
73	ES mit BK	24h/200°C	4.32	3.60	32.38	0.88	1.12
74	ES mit BK	24h/200°C	4.57	3.39	32.51	0.62	0.89
75	ES mit BK	24h/200°C	5.36	5.67	32.61	0.60	3.21
76	ES mit BK	24h/200°C	5.20	5.32	32.51	0.63	3.05
77	ES mit BK	24h/200°C	4.94	4.75	32.04	1.23	2.09
78	ES mit BK	24h/200°C	5.20	5.10	32.74	0.08	0.88
		Mittelwert	4.85	4.52	32.36	0.66	1.60
		Standartabweichung	0.37	0.82	0.29	0.40	1.06

1) Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-12: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
36	BU unbehandelt	0	7.97	17.85	74.52	0.00	0.00
36	BU unbehandelt	48	9.16	23.68	68.22	6.30	8.66
36	BU unbehandelt	96	9.27	23.86	67.82	6.70	9.09
36	BU unbehandelt	168	9.35	23.94	67.56	6.96	9.35
36	BU unbehandelt	240	9.24	23.90	67.17	7.35	9.60
36	BU unbehandelt	336	9.34	23.75	67.19	7.33	9.50
36	BU unbehandelt	432	9.69	23.62	67.27	7.25	9.43

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
33	BU 6h/180°C	0	9.33	19.34	58.07	0.00	0.00
33	BU 6h/180°C	48	7.83	19.56	59.18	-1.11	1.88
33	BU 6h/180°C	96	7.64	19.66	59.93	-1.85	2.52
33	BU 6h/180°C	168	7.45	19.81	60.91	-2.84	3.44
33	BU 6h/180°C	240	7.21	19.89	61.50	-3.43	4.07
33	BU 6h/180°C	336	7.29	19.84	61.95	-3.88	4.41
33	BU 6h/180°C	432	7.72	20.12	62.59	-4.51	4.85

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
34	BU 12h/180°C	0	9.61	18.57	52.98	0.00	0.00
34	BU 12h/180°C	48	7.56	17.95	55.57	-2.59	3.36
34	BU 12h/180°C	96	7.25	17.85	56.61	-3.63	4.39
34	BU 12h/180°C	168	6.93	17.77	57.82	-4.84	5.58
34	BU 12h/180°C	240	6.62	17.66	58.59	-5.61	6.42
34	BU 12h/180°C	336	6.61	17.61	59.24	-6.26	7.00
34	BU 12h/180°C	432	6.85	17.72	59.62	-6.64	7.24

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
35	BU 24h/180°C	0	9.05	15.26	44.06	0.00	0.00
35	BU 24h/180°C	48	6.82	14.13	47.80	-3.73	4.49
35	BU 24h/180°C	96	6.57	14.13	49.13	-5.07	5.75
35	BU 24h/180°C	168	6.13	13.96	50.50	-6.43	7.19
35	BU 24h/180°C	240	5.77	14.05	51.66	-7.60	8.37
35	BU 24h/180°C	336	5.65	13.87	52.40	-8.33	9.11
35	BU 24h/180°C	432	5.76	13.95	53.29	-9.23	9.88

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-13: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Acrylatlack Versiegelung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
31	BU unbehandelt	0	10.49	25.81	67.67	0.00	0.00
31	BU unbehandelt	48	12.60	30.08	62.15	5.53	7.30
31	BU unbehandelt	96	13.15	30.98	61.31	6.36	8.61
31	BU unbehandelt	168	13.53	31.85	60.66	7.01	9.74
31	BU unbehandelt	240	13.57	32.34	60.20	7.48	10.39
31	BU unbehandelt	336	13.88	32.70	59.80	7.88	11.00
31	BU unbehandelt	432	14.39	32.95	59.77	7.90	11.34

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
29	BU 6h/180°C	0	14.22	22.13	43.86	0.00	0.00
29	BU 6h/180°C	48	13.83	21.95	43.24	0.62	0.76
29	BU 6h/180°C	96	13.78	22.53	43.82	0.04	0.59
29	BU 6h/180°C	168	13.75	23.28	44.60	-0.73	1.44
29	BU 6h/180°C	240	13.66	23.86	45.04	-1.18	2.16
29	BU 6h/180°C	336	13.81	24.46	45.46	-1.60	2.85
29	BU 6h/180°C	432	14.21	24.98	46.01	-2.15	3.57

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
27	BU 12h/180°C	0	13.67	17.97	37.74	0.00	0.00
27	BU 12h/180°C	48	13.09	18.12	38.08	-0.34	0.68
27	BU 12h/180°C	96	13.07	18.76	38.79	-1.05	1.44
27	BU 12h/180°C	168	13.02	19.76	39.82	-2.08	2.81
27	BU 12h/180°C	240	12.86	20.49	40.53	-2.79	3.84
27	BU 12h/180°C	336	12.98	21.22	41.20	-3.46	4.80
27	BU 12h/180°C	432	13.44	22.36	42.33	-4.59	6.35

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
25	BU 24h/180°C	0	11.62	11.42	31.45	0.00	0.00
25	BU 24h/180°C	48	11.37	11.62	31.72	-0.27	0.43
25	BU 24h/180°C	96	11.41	12.21	32.34	-0.89	1.21
25	BU 24h/180°C	168	11.46	13.10	33.20	-1.75	2.43
25	BU 24h/180°C	240	11.37	13.77	33.83	-2.38	3.36
25	BU 24h/180°C	336	11.56	14.54	34.58	-3.13	4.42
25	BU 24h/180°C	432	11.72	15.00	35.22	-3.77	5.20

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-14: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von unbehandelter Buche und thermisch behandelter Buche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Wasserlack Versiegelung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
32	BU unbehandelt	0	9.09	20.21	67.45	0.00	0.00
32	BU unbehandelt	48	8.80	23.71	66.01	1.44	3.80
32	BU unbehandelt	96	8.19	23.75	67.05	0.40	3.67
32	BU unbehandelt	168	7.38	23.68	68.47	-1.01	4.00
32	BU unbehandelt	240	6.67	23.45	69.35	-1.89	4.46
32	BU unbehandelt	336	6.47	23.33	70.07	-2.61	4.84
32	BU unbehandelt	432	6.29	23.11	70.93	-3.47	5.32

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
30	BU 6h/180°C	0	10.60	21.61	48.37	0.00	0.00
30	BU 6h/180°C	48	8.32	21.69	54.19	-5.83	6.26
30	BU 6h/180°C	96	7.58	21.62	56.38	-8.01	8.56
30	BU 6h/180°C	168	6.66	21.36	59.06	-10.69	11.40
30	BU 6h/180°C	240	5.84	21.01	60.98	-12.61	13.49
30	BU 6h/180°C	336	5.52	20.66	62.39	-14.03	14.95
30	BU 6h/180°C	432	5.29	20.23	63.93	-15.56	16.50

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
28	BU 12h/180°C	0	11.42	21.02	43.27	0.00	0.00
28	BU 12h/180°C	48	8.79	21.31	50.43	-7.16	7.63
28	BU 12h/180°C	96	7.98	21.22	52.93	-9.66	10.25
28	BU 12h/180°C	168	6.91	20.94	56.09	-12.82	13.59
28	BU 12h/180°C	240	6.09	20.50	58.05	-14.78	15.71
28	BU 12h/180°C	336	5.55	20.08	60.07	-16.79	17.81
28	BU 12h/180°C	432	5.30	19.70	61.68	-18.41	19.44

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
26	BU 24h/180°C	0	11.51	15.83	34.80	0.00	0.00
26	BU 24h/180°C	48	9.37	17.82	41.46	-6.66	7.27
26	BU 24h/180°C	96	8.53	18.02	44.14	-9.33	10.04
26	BU 24h/180°C	168	7.44	18.04	48.09	-13.29	14.07
26	BU 24h/180°C	240	6.39	17.83	50.86	-16.06	16.97
26	BU 24h/180°C	336	5.82	17.52	53.11	-18.31	19.25
26	BU 24h/180°C	432	5.53	17.50	55.67	-20.87	21.77

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-15: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
24	ES unbehandelt	0	6.74	19.17	77.18	0.00	0
24	ES unbehandelt	48	7.53	27.80	71.83	5.34	10.18
24	ES unbehandelt	96	7.99	28.68	70.90	6.27	11.46
24	ES unbehandelt	168	8.49	29.19	70.29	6.89	12.28
24	ES unbehandelt	240	8.78	29.67	70.42	6.76	12.65
24	ES unbehandelt	336	9.02	29.16	69.49	7.68	12.81
24	ES unbehandelt	432	9.67	29.31	69.51	7.67	13.04

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
21	ES 6h/180°C	0	8.38	20.87	58.10	0.00	0
21	ES 6h/180°C	48	7.05	20.20	59.14	-1.04	1.81
21	ES 6h/180°C	96	6.86	20.33	59.90	-1.80	2.42
21	ES 6h/180°C	168	6.70	20.50	60.79	-2.69	3.20
21	ES 6h/180°C	240	6.47	20.49	61.29	-3.19	3.73
21	ES 6h/180°C	336	6.54	20.53	61.73	-3.64	4.09
21	ES 6h/180°C	432	6.95	20.59	61.91	-3.81	4.08

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
22	ES 12h/180°C	0	9.76	19.96	51.22	0.00	0
22	ES 12h/180°C	48	7.28	18.22	53.93	-2.71	4.06
22	ES 12h/180°C	96	6.94	18.09	55.11	-3.89	5.16
22	ES 12h/180°C	168	6.72	18.24	56.06	-4.84	5.97
22	ES 12h/180°C	240	6.31	18.18	57.17	-5.95	7.11
22	ES 12h/180°C	336	6.34	18.20	57.60	-6.38	7.45
22	ES 12h/180°C	432	6.64	18.54	57.82	-6.60	7.44

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
23	ES 24h/180°C	0	9.52	17.55	45.07	0.00	0
23	ES 24h/180°C	48	6.96	15.83	48.71	-3.64	4.77
23	ES 24h/180°C	96	6.53	15.74	50.19	-5.12	6.19
23	ES 24h/180°C	168	6.09	15.66	51.83	-6.77	7.82
23	ES 24h/180°C	240	5.77	15.58	52.79	-7.72	8.80
23	ES 24h/180°C	336	5.68	15.62	53.75	-8.68	9.69
23	ES 24h/180°C	432	5.89	15.56	54.36	-9.29	10.17

1) Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-16: a^* , b^* , L^* , ΔL und ΔE -Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Acrylatlack Versiegelung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
19	ES unbehandelt	0	10.94	25.40	68.52	0.00	0.00
19	ES unbehandelt	48	10.74	30.72	64.80	3.73	6.50
19	ES unbehandelt	96	10.97	31.71	64.15	4.38	7.68
19	ES unbehandelt	168	11.29	32.87	63.58	4.95	8.96
19	ES unbehandelt	240	11.46	33.58	62.90	5.62	9.94
19	ES unbehandelt	336	11.87	34.12	62.34	6.18	10.73
19	ES unbehandelt	432	12.56	34.26	62.07	6.46	11.08

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
17	ES 6h/180°C	0	12.66	24.79	46.06	0.00	0.00
17	ES 6h/180°C	48	12.03	24.07	45.89	0.17	0.98
17	ES 6h/180°C	96	11.77	24.42	46.59	-0.53	1.10
17	ES 6h/180°C	168	11.53	25.12	47.52	-1.46	1.88
17	ES 6h/180°C	240	11.35	25.74	48.04	-1.97	2.55
17	ES 6h/180°C	336	11.45	26.25	48.42	-2.36	3.02
17	ES 6h/180°C	432	11.85	26.70	48.86	-2.80	3.49

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
15	ES 12h/180°C	0	13.54	17.49	36.25	0.00	0.00
15	ES 12h/180°C	48	12.81	17.52	36.67	-0.42	0.84
15	ES 12h/180°C	96	12.71	18.03	37.24	-0.99	1.40
15	ES 12h/180°C	168	12.50	18.82	38.22	-1.97	2.60
15	ES 12h/180°C	240	12.27	19.48	38.94	-2.69	3.58
15	ES 12h/180°C	336	12.37	20.13	39.57	-3.32	4.40
15	ES 12h/180°C	432	12.59	20.54	40.11	-3.86	5.01

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a^{*1}	b^{*1}	L^{*1}	ΔL	ΔE
13	ES 24h/180°C	0	12.50	15.63	34.72	0.00	0.00
13	ES 24h/180°C	48	11.78	15.72	35.21	-0.48	0.87
13	ES 24h/180°C	96	11.57	16.21	35.95	-1.23	1.64
13	ES 24h/180°C	168	11.39	17.03	36.99	-2.27	2.89
13	ES 24h/180°C	240	11.14	18.58	38.84	-4.12	5.25
13	ES 24h/180°C	336	11.19	18.39	38.53	-3.81	4.88
13	ES 24h/180°C	432	11.30	18.76	39.37	-4.65	5.73

¹⁾ Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-17 a*, b*, L*, ΔL und ΔE-Werte von unbehandelter Esche und thermisch behandelter Esche vor und nach der UV-Bestrahlung. Proben mit Wasserlack Versiegelung

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a* ¹	b* ¹	L* ¹	ΔL	ΔE
20	ES unbehandelt	0	9.48	21.62	67.02	0.00	0.00
20	ES unbehandelt	48	9.22	27.12	65.86	1.16	5.63
20	ES unbehandelt	96	8.93	27.57	66.47	0.55	6.00
20	ES unbehandelt	168	8.52	28.02	67.39	-0.37	6.48
20	ES unbehandelt	240	8.00	28.19	68.06	-1.04	6.81
20	ES unbehandelt	336	8.02	28.28	68.46	-1.44	6.96
20	ES unbehandelt	432	7.98	28.21	69.32	-2.30	7.14

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a* ¹	b* ¹	L* ¹	ΔL	ΔE
18	ES 6h/180°C	0	11.74	24.58	48.39	0.00	0.00
18	ES 6h/180°C	48	9.10	24.06	54.62	-6.24	6.79
18	ES 6h/180°C	96	8.36	24.03	56.71	-8.33	9.00
18	ES 6h/180°C	168	7.42	23.77	59.30	-10.91	11.76
18	ES 6h/180°C	240	6.60	23.40	61.07	-12.69	13.74
18	ES 6h/180°C	336	6.30	22.97	62.43	-14.05	15.15
18	ES 6h/180°C	432	6.09	22.53	63.82	-15.43	16.56

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a* ¹	b* ¹	L* ¹	ΔL	ΔE
16	ES 12h/180°C	0	11.42	15.11	33.64	0.00	0.00
16	ES 12h/180°C	48	9.38	17.61	40.27	-6.64	7.38
16	ES 12h/180°C	96	8.62	17.90	42.68	-9.04	9.86
16	ES 12h/180°C	168	7.61	17.87	45.89	-12.25	13.12
16	ES 12h/180°C	240	6.81	17.72	48.18	-14.54	15.48
16	ES 12h/180°C	336	6.36	17.56	50.10	-16.46	17.40
16	ES 12h/180°C	432	6.20	17.28	51.84	-18.20	19.06

PrNr	Holzart	Bestrahlungsdauer [h]	a* ¹	b* ¹	L* ¹	ΔL	ΔE
14	ES 24h/180°C	0	12.56	21.27	40.84	0.00	0.00
14	ES 24h/180°C	48	9.90	22.55	48.29	-7.45	8.01
14	ES 24h/180°C	96	8.94	22.64	51.00	-10.16	10.87
14	ES 24h/180°C	168	7.64	22.25	54.43	-13.59	14.48
14	ES 24h/180°C	240	6.57	21.57	56.53	-15.69	16.80
14	ES 24h/180°C	336	6.10	21.21	58.72	-17.88	19.01
14	ES 24h/180°C	432	5.74	20.61	60.35	-19.51	20.67

1) Mittelwert aus vier Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-18: Holzausgleichsfeuchte in % von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit

Serie	Klima	20°C/35% r.L.						20°C/50% r.L.						20°C/65% r.L.						20°C/80% r.L.						20°C/93% r.L.					
		Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung	Mittelwert	Standartabweichung				
unbehandelt ohne RK		9.37	0.07	10.52	0.08	12.56	0.10	15.09	0.09	19.99	0.12																				
		0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.16	0.12	0.25	0.12																				
unbehandelt mit RK		9.35	0.08	10.47	0.09	12.69	0.10	15.47	0.12	19.92	0.25																				
		0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.16	0.12	0.25	0.12																					
6h/180°C ohne RK		5.65	0.11	6.61	0.12	9.23	0.11	12.89	0.16	18.14	0.12																				
		0.11	0.12	0.12	0.16	0.12	0.16	0.12	0.12	0.12																					
6h/180°C mit RK		5.75	0.11	6.64	0.12	9.33	0.11	12.95	0.16	18.29	0.12																				
		0.11	0.12	0.12	0.16	0.12	0.16	0.12	0.12	0.12																					
12h/180°C ohne RK		4.81	0.08	5.85	0.04	8.21	0.04	11.55	0.07	16.47	0.06																				
		0.08	0.04	0.04	0.06	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06																					
12h/180°C mit RK		4.78	0.14	5.91	0.12	8.30	0.12	11.55	0.14	16.34	0.20																				
		0.14	0.12	0.12	0.14	0.12	0.14	0.12	0.14	0.20																					
24h/180°C ohne RK		4.34	0.15	5.28	0.13	7.50	0.13	10.70	0.18	15.33	0.22																				
		0.15	0.13	0.13	0.18	0.13	0.18	0.13	0.18	0.22																					
24h/180°C mit RK		4.34	0.09	5.31	0.09	7.52	0.11	10.57	0.13	15.14	0.18																				
		0.09	0.09	0.09	0.13	0.11	0.13	0.11	0.13	0.18																					
24h/160°C ohne RK		5.47	0.11	6.69	0.06	9.41	0.07	12.95	0.11	18.11	0.11																				
		0.11	0.06	0.06	0.11	0.07	0.11	0.11	0.11	0.11																					
24h/160°C mit RK		5.39	0.12	6.69	0.10	9.34	0.10	12.83	0.13	17.79	0.19																				
		0.12	0.10	0.10	0.13	0.10	0.13	0.10	0.13	0.19																					
6h/200°C ohne RK		4.36	0.09	4.79	0.12	6.03	0.11	8.77	0.11	12.53	0.32																				
		0.09	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.32																					
6h/200°C mit RK		4.39	0.24	4.59	0.11	6.16	0.36	8.88	0.49	12.63	0.73																				
		0.24	0.11	0.11	0.36	0.36	0.49	0.36	0.49	0.73																					

Tabelle A-19: Quellmass in % von Buche ohne Rotkern und Buche mit Rotkern. RK = Rotkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit

Serie	Klima	20°C/35% r.L.			20°C/50% r.L.			20°C/65% r.L.			20°C/80% r.L.			20°C/83% r.L.		
		radial	tangential	longitudinal												
unbehandelt ohne RK	Mittelwert	1.80	3.29	0.33	1.97	3.67	0.18	2.37	4.47	0.41	2.81	5.44	0.42	3.50	7.71	0.49
	Standardabweichung	0.07	0.13	0.15	0.05	0.17	0.20	0.07	0.17	0.20	0.09	0.15	0.16	0.07	0.16	0.14
unbehandelt mit RK	Mittelwert	1.99	3.47	0.19	2.16	3.85	0.13	2.65	4.80	0.19	3.16	5.99	0.29	3.91	8.05	0.36
	Standardabweichung	0.10	0.15	0.14	0.09	0.12	0.07	0.14	0.19	0.09	0.15	0.17	0.11	0.26	0.25	0.11
6h/180°C ohne RK	Mittelwert	1.10	1.68	0.09	1.32	2.04	0.10	1.77	3.06	0.11	2.32	4.68	0.17	3.22	6.99	0.20
	Standardabweichung	0.06	0.09	0.18	0.11	0.10	0.24	0.10	0.08	0.14	0.15	0.20	0.19	0.06	0.07	0.17
6h/180°C mit RK	Mittelwert	1.14	2.35	1.38	1.38	2.64	1.38	1.81	3.73	1.48	2.34	5.12	1.50	3.14	7.38	1.40
	Standardabweichung	0.21	0.65	0.96	0.14	0.53	0.92	0.10	0.39	0.99	0.13	0.27	0.88	0.07	0.08	0.85
12h/180°C ohne RK	Mittelwert	0.62	0.92	0.34	0.78	1.27	0.23	1.24	2.32	0.33	1.86	3.74	0.38	2.71	5.89	0.42
	Standardabweichung	0.11	0.11	0.07	0.07	0.11	0.07	0.06	0.12	0.09	0.05	0.15	0.14	0.08	0.12	0.13
12h/180°C mit RK	Mittelwert	0.65	1.09	0.18	0.90	1.53	0.16	1.41	2.65	0.29	1.98	4.05	0.27	2.85	6.35	0.30
	Standardabweichung	0.10	0.14	0.13	0.09	0.15	0.10	0.09	0.14	0.08	0.08	0.13	0.05	0.12	0.10	0.10
24h/180°C ohne RK	Mittelwert	0.60	0.96	0.29	0.79	1.28	0.29	1.18	2.13	0.28	1.76	3.55	0.31	2.53	5.64	0.40
	Standardabweichung	0.09	0.14	0.11	0.07	0.10	0.06	0.07	0.11	0.08	0.11	0.07	0.06	0.10	0.14	0.09
24h/180°C mit RK	Mittelwert	0.65	0.96	0.31	0.83	1.35	0.29	1.28	2.27	0.30	1.89	3.64	0.36	2.78	5.83	0.43
	Standardabweichung	0.06	0.11	0.16	0.05	0.11	0.11	0.05	0.11	0.07	0.11	0.10	0.12	0.10	0.15	0.13
24h/160°C ohne RK	Mittelwert	0.75	1.21	0.22	0.93	1.68	0.23	1.45	2.78	0.13	2.03	4.36	0.22	2.87	6.60	0.34
	Standardabweichung	0.08	0.13	0.13	0.07	0.10	0.07	0.13	0.08	0.05	0.08	0.13	0.07	0.08	0.16	0.09
24h/160°C mit RK	Mittelwert	0.85	1.34	0.19	1.12	1.88	0.23	1.59	2.99	0.16	2.28	4.62	0.27	3.15	6.99	0.24
	Standardabweichung	0.16	0.14	0.09	0.16	0.12	0.09	0.13	0.11	0.07	0.15	0.13	0.10	0.19	0.13	0.09
6h/200°C ohne RK	Mittelwert	0.81	1.32	0.24	0.90	1.46	0.22	1.15	1.95	0.23	1.60	3.19	0.27	2.21	4.87	0.23
	Standardabweichung	0.07	0.11	0.10	0.07	0.12	0.13	0.08	0.10	0.12	0.07	0.11	0.14	0.12	0.18	0.09
6h/200°C mit RK	Mittelwert	0.90	1.44	0.17	0.94	1.39	0.20	1.23	2.19	0.17	1.68	3.35	0.23	2.33	5.26	0.13
	Standardabweichung	0.11	0.22	0.17	0.04	0.21	0.34	0.09	0.35	0.11	0.09	0.41	0.21	0.12	0.43	0.18

Tabelle A-20: Holzausgleichsfeuchte in % von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit

Serie	Klima	20°C/35% r.L.	20°C/50% r.L.	20°C/65% r.L.	20°C/80% r.L.	20°C/93% r.L.
		Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert	Mittelwert
unbehandelt ohne BK	Standardabweichung	0.15	0.07	0.04	0.06	0.07
	Mittelwert	9.30	10.21	11.88	14.64	20.49
unbehandelt mit BK	Standardabweichung	0.04	0.06	0.04	0.06	0.08
	Mittelwert	5.72	6.15	7.02	8.52	12.10
6h/200°C ohne BK	Standardabweichung	0.09	0.09	0.08	0.11	0.09
	Mittelwert	5.84	6.30	7.21	8.84	12.61
6h/200°C mit BK	Standardabweichung	0.09	0.07	0.09	0.08	0.07
	Mittelwert	5.63	6.10	6.87	8.14	11.22
12h/200°C ohne BK	Standardabweichung	0.09	0.07	0.07	0.04	0.06
	Mittelwert	5.64	6.11	6.69	8.25	11.48
12h/200°C mit BK	Standardabweichung	0.05	0.05	0.04	0.08	0.09
	Mittelwert	5.83	6.25	6.99	8.32	11.18
24h/200°C ohne BK	Standardabweichung	0.10	0.08	0.06	0.13	0.09
	Mittelwert	5.84	6.27	6.99	8.35	11.26
24h/200°C mit BK	Standardabweichung	0.15	0.16	0.17	0.13	0.07
	Mittelwert	6.16	6.80	8.28	12.28	16.75
24h/160°C ohne BK	Standardabweichung	0.10	0.07	0.05	0.08	0.11
	Mittelwert	6.47	7.03	8.31	12.18	16.77
24h/160°C mit BK	Standardabweichung	0.13	0.13	0.06	0.15	0.18
	Mittelwert	4.85	5.31	6.42	9.65	13.51
24h/180°C ohne BK	Standardabweichung	0.04	0.07	0.07	0.09	0.05
	Mittelwert	4.80	5.28	6.47	9.71	13.62
24h/180°C mit BK	Standardabweichung	0.10	0.07	0.04	0.06	0.04
	Mittelwert	0.10	0.07	0.04	0.06	0.04

Tabelle A-21: Quellmass in % von Esche ohne Braunkern und Esche mit Braunkern. BK = Braunkern, r.L. = relative Luftfeuchtigkeit

Serie	Klima	20°C/85% r.L.			20°C/50% r.L.			20°C/65% r.L.			20°C/80% r.L.			20°C/83% r.L.		
		radial	tangential	longitudinal												
unbehandelt ohne BK	Mittelwert	1.30	1.34	0.22	1.49	1.73	0.24	1.80	2.27	0.30	2.31	3.56	0.22	3.33	6.95	0.27
	Standardabweichung	0.05	0.14	0.08	0.04	0.23	0.09	0.04	0.12	0.12	0.06	0.15	0.07	0.06	0.13	0.13
unbehandelt mit BK	Mittelwert	1.78	2.36	0.17	1.99	2.78	0.24	2.37	3.29	0.22	2.87	4.36	0.22	3.93	7.09	0.23
	Standardabweichung	0.08	0.10	0.13	0.09	0.11	0.14	0.11	0.06	0.13	0.09	0.08	0.13	0.10	0.10	0.21
6h/200°C ohne BK	Mittelwert	0.91	1.68	0.24	1.05	1.86	0.32	1.21	2.14	0.23	1.45	2.66	0.22	2.08	4.14	0.23
	Standardabweichung	0.03	0.04	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.05	0.04	0.07	0.03	0.05	0.12
6h/200°C mit BK	Mittelwert	0.99	1.78	0.19	1.14	1.98	0.18	1.27	2.30	0.20	1.60	2.92	0.21	2.27	4.42	0.17
	Standardabweichung	0.07	0.04	0.08	0.14	0.07	0.08	0.09	0.07	0.09	0.07	0.09	0.11	0.07	0.08	0.11
12h/200°C ohne BK	Mittelwert	0.91	1.68	0.11	1.06	1.86	0.32	1.21	2.11	0.21	1.43	2.56	0.02	1.99	3.85	0.11
	Standardabweichung	0.08	0.04	0.13	0.08	0.08	0.35	0.07	0.06	0.18	0.08	0.04	0.20	0.06	0.08	0.06
12h/200°C mit BK	Mittelwert	0.92	1.64	0.01	1.12	1.83	0.04	1.33	2.12	-0.03	1.52	2.57	0.00	2.09	3.93	0.00
	Standardabweichung	0.08	0.10	0.16	0.09	0.13	0.17	0.07	0.11	0.14	0.10	0.10	0.15	0.13	0.10	0.14
24h/200°C ohne BK	Mittelwert	1.05	1.85	0.31	1.19	2.03	0.31	1.31	2.29	0.29	1.52	2.78	0.21	2.07	4.00	0.24
	Standardabweichung	0.07	0.04	0.09	0.13	0.04	0.09	0.07	0.07	0.09	0.05	0.07	0.14	0.10	0.06	0.12
24h/200°C mit BK	Mittelwert	1.03	1.74	0.24	1.16	1.91	0.28	1.35	2.15	0.26	1.56	2.65	0.13	2.20	3.95	0.17
	Standardabweichung	0.08	0.19	0.10	0.09	0.17	0.14	0.13	0.18	0.09	0.09	0.15	0.14	0.06	0.18	0.14
24h/160°C ohne BK	Mittelwert	0.99	1.47	0.24	1.10	1.68	0.22	1.37	2.30	0.16	2.07	3.96	0.29	2.83	6.03	0.13
	Standardabweichung	0.06	0.05	0.18	0.04	0.06	0.10	0.05	0.08	0.13	0.04	0.06	0.09	0.03	0.05	0.10
24h/160°C mit BK	Mittelwert	1.25	1.82	0.16	1.39	2.01	0.24	1.69	2.48	0.17	2.48	4.01	0.19	3.49	5.93	0.19
	Standardabweichung	0.05	0.11	0.09	0.09	0.14	0.07	0.08	0.11	0.09	0.08	0.07	0.13	0.05	0.05	0.08
24h/180°C ohne BK	Mittelwert	0.86	1.35	0.39	0.96	1.48	0.40	1.17	1.89	0.37	1.71	3.18	0.43	2.40	4.78	0.34
	Standardabweichung	0.04	0.06	0.11	0.03	0.05	0.14	0.04	0.04	0.13	0.05	0.06	0.09	0.07	0.06	0.09
24h/180°C mit BK	Mittelwert	0.90	1.22	0.22	1.00	1.37	0.27	1.24	1.73	0.21	1.92	2.87	0.21	2.68	4.27	0.17
	Standardabweichung	0.07	0.10	0.14	0.10	0.06	0.18	0.05	0.03	0.14	0.04	0.09	0.09	0.05	0.08	0.09

Tabelle A-22: Masseänderung und Volumenänderung von Buche ohne Rotkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
41	6h/180°C	14.67	14.39	1.98
42	6h/180°C	14.64	14.38	1.78
43	6h/180°C	14.61	14.38	1.57
44	6h/180°C	14.63	14.38	1.71
45	6h/180°C	13.92	13.60	2.30
Mittelwert				1.87
Standartabweichung				0.28

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.95	47.97	9.99	23457.83	48.67	47.44	10.07	23250.67	0.88
48.96	47.70	10.12	23634.17	48.87	47.64	10.07	23444.64	0.80
48.93	47.89	9.97	23362.28	48.86	47.20	10.01	23094.98	1.19
48.97	47.87	10.06	23582.59	48.78	47.60	10.02	23265.72	1.34
48.97	47.88	10.01	23470.28	48.83	47.57	10.02	23274.89	0.83
Mittelwert								1.009636514
Standartabweichung								0.241628186

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
61	12h/180°C	14.69	14.28	2.82
62	12h/180°C	14.66	14.23	2.98
63	12h/180°C	15.42	14.97	2.87
64	12h/180°C	15.12	14.70	2.78
65	12h/180°C	14.91	14.49	2.83
66	12h/180°C	14.86	14.42	2.93
67	12h/180°C	14.55	14.12	2.94
68	12h/180°C	15.37	14.93	2.86
69	12h/180°C	14.00	13.61	2.78
70	12h/180°C	14.80	14.40	2.68
Mittelwert				2.85
Standartabweichung				0.09

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
49.09	48.10	9.96	23517.84	48.90	47.57	9.98	23215.21	1.29
49.07	47.99	10.01	23572.24	48.92	47.59	10.02	23327.59	1.04
48.94	47.89	10.04	23551.12	48.83	47.45	10.02	23216.17	1.34
48.93	47.90	10.02	23484.34	48.78	47.45	10.02	23197.16	1.22
48.99	47.91	10.03	23541.52	48.81	47.50	10.01	23207.93	1.42
48.96	47.98	10.05	23608.46	48.84	47.48	10.03	23258.80	1.48
49.01	48.03	10.02	23586.58	48.99	47.56	10.01	23275.34	1.32
48.93	47.85	10.01	23436.42	48.79	47.37	10.01	23134.93	1.29
48.92	47.80	10.02	23430.53	48.78	47.34	10.01	23115.54	1.34
48.98	47.87	10.01	23470.17	48.80	47.43	10.01	23168.99	1.28
Mittelwert								1.30
Standartabweichung								0.118119927

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
101	24h/180°C	14.02	13.39	4.53
102	24h/180°C	14.64	14.04	4.05
103	24h/180°C	14.67	14.10	3.92
104	24h/180°C	14.03	13.46	4.11
105	24h/180°C	14.00	13.40	4.27
106	24h/180°C	13.99	13.38	4.35
107	24h/180°C	14.12	13.48	4.56
108	24h/180°C	14.02	13.40	4.44
109	24h/180°C	14.81	14.22	4.00
110	24h/180°C	14.64	14.08	3.82
Mittelwert				4.21
Standartabweichung				0.26

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
49.06	47.93	10.02	23561.49	48.70	47.06	10.02	22964.06	2.54
49.15	48.19	10.01	23709.07	48.77	47.23	10.01	23057.11	2.75
49.08	48.10	10.01	23631.09	48.76	47.20	10.00	23014.72	2.61
49.01	48.02	10.00	23534.60	48.72	47.13	10.00	22961.74	2.43
48.94	47.85	10.02	23464.63	48.63	46.96	10.01	22859.48	2.58
48.97	48.00	10.01	23529.11	48.66	46.90	10.00	22821.54	3.01
48.94	47.94	10.02	23508.76	48.63	46.96	10.02	22882.32	2.86
48.99	47.97	10.00	23500.50	48.69	47.03	9.98	22853.11	2.75
49.04	48.04	10.01	23582.37	48.74	47.14	10.00	22976.04	2.57
49.00	48.01	9.99	23501.38	48.69	47.16	9.98	22916.28	2.49
Mittelwert								2.64
Standartabweichung								0.17

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
21	6h/200°C	14.02	12.78	8.84
22	6h/200°C	14.11	12.85	8.93
23	6h/200°C	14.68	13.50	8.04
24	6h/200°C	15.03	13.81	8.12
25	6h/200°C	15.03	13.83	7.98
Mittelwert				8.38
Standartabweichung				0.46

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.99	47.92	10.00	23476.01	48.35	46.01	10.01	22268.08	5.15
48.91	47.83	9.98	23346.87	48.28	45.90	9.98	22116.20	5.27
48.96	47.91	10.03	23527.11	48.32	45.99	10.03	22289.04	5.26
48.97	47.89	10.00	23451.73	48.35	45.99	10.01	22258.40	5.09
48.99	47.86	9.99	23423.17	48.44	45.99	10.01	22299.83	4.80
Mittelwert								5.11
Standartabweichung								0.19

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
121	6h/160°C	14.61	14.52	0.62
122	6h/160°C	14.63	14.51	0.82
123	6h/160°C	14.63	14.54	0.62
124	6h/160°C	14.61	14.52	0.62
125	6h/160°C	14.63	14.54	0.62
126	6h/160°C	13.97	13.90	0.50
127	6h/160°C	13.81	13.73	0.58
128	6h/160°C	13.78	13.69	0.65
129	6h/160°C	13.96	13.87	0.64
130	6h/160°C	14.00	13.93	0.50
Mittelwert				0.62
Standartabweichung				0.09

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
49.00	47.80	9.99	23398.58	48.90	47.75	9.99	23326.40	0.31
48.95	47.88	9.97	23366.95	48.88	47.73	9.99	23307.09	0.26
49.02	47.97	10.00	23514.89	48.92	47.83	10.00	23398.44	0.50
48.97	47.95	9.99	23457.63	48.92	47.88	9.99	23399.47	0.25
48.98	48.00	10.00	23510.40	48.91	47.83	9.99	23370.26	0.60
48.95	47.86	10.04	23521.18	48.88	47.70	10.02	23362.39	0.68
48.96	47.88	10.00	23442.05	48.94	47.83	10.00	23408.00	0.15
48.97	47.95	10.04	23575.04	48.93	47.81	10.04	23487.01	0.37
48.92	47.80	9.97	23313.61	48.91	47.68	9.98	23273.65	0.17
48.93	47.80	10.02	23435.32	48.89	47.70	10.01	23343.85	0.39
Mittelwert								0.37
Standartabweichung								0.18

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
81	24h/160°C	13.91	13.72	1.34
82	24h/160°C	13.93	13.74	1.38
83	24h/160°C	13.79	13.60	1.41
84	24h/160°C	13.81	13.61	1.41
85	24h/160°C	13.75	13.55	1.42
86	24h/160°C	14.06	13.88	1.29
87	24h/160°C	13.79	13.61	1.28
88	24h/160°C	14.51	14.33	1.27
89	24h/160°C	14.57	14.39	1.26
90	24h/160°C	14.77	14.58	1.29
Mittelwert				1.33
Standartabweichung				0.06

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
49.04	48.00	10.04	23633.36	48.94	47.81	10.04	23491.81	0.60
49.05	47.99	10.01	23562.63	48.97	47.81	10.00	23412.56	0.64
49.03	48.02	10.00	23544.21	48.99	47.82	10.04	23520.73	0.10
49.05	48.02	10.03	23624.47	48.95	47.76	10.03	23448.66	0.74
49.05	48.02	10.01	23577.36	48.95	47.78	10.02	23435.09	0.60
49.02	47.98	9.96	23425.72	48.90	47.70	9.96	23232.00	0.83
49.08	48.12	10.01	23640.91	48.99	47.85	10.01	23465.16	0.74
49.06	48.06	9.99	23554.66	49.01	47.86	10.00	23456.19	0.42
49.04	48.04	10.00	23558.82	48.97	47.83	10.00	23422.35	0.58
49.01	48.04	10.02	23591.49	48.97	47.78	10.02	23444.66	0.62
Mittelwert								0.59
Standartabweichung								0.20

Tabelle A-23: Masseänderung und Volumenänderung von Buche mit Rotkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
51	6h/180°C	16.34	16.08	1.59
52	6h/180°C	16.25	15.98	1.66
53	6h/180°C	16.17	15.92	1.55
54	6h/180°C	16.18	15.93	1.55
55	6h/180°C	16.27	16.00	1.66
Mittelwert				1.60
Standartabweichung				0.06

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.75	47.59	9.98	23153.72	48.69	47.30	10.01	23053.40	0.43
48.76	47.56	9.96	23087.49	48.68	47.27	9.98	22965.01	0.57
48.87	47.56	9.98	23196.09	48.73	47.32	9.98	23012.92	0.79
48.89	47.64	9.96	23198.03	48.71	47.27	9.97	22956.14	1.04
48.83	47.63	9.96	23164.70	48.73	47.33	9.98	23017.78	0.63
Mittelwert								0.69
Standartabweichung								0.23

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
71	12h/180°C	15.71	15.32	2.54
72	12h/180°C	16.36	15.95	2.48
73	12h/180°C	16.46	16.04	2.52
74	12h/180°C	16.40	15.98	2.54
75	12h/180°C	16.17	15.77	2.46
76	12h/180°C	16.36	15.97	2.41
77	12h/180°C	16.27	15.89	2.32
78	12h/180°C	16.12	15.74	2.38
79	12h/180°C	16.19	15.80	2.40
80	12h/180°C	16.08	15.68	2.49
Mittelwert				2.45
Standartabweichung				0.08

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.73	47.76	10.02	23319.99	48.60	47.43	10.03	23120.13	0.86
48.79	47.62	9.98	23187.33	48.70	47.20	9.98	22940.43	1.06
48.82	47.64	9.99	23234.59	48.68	47.19	9.99	22949.12	1.23
48.84	47.50	9.90	22967.01	48.74	47.10	10.00	22956.54	0.05
48.73	47.59	9.99	23167.42	48.55	47.10	10.00	22867.05	1.30
48.81	47.61	10.01	23261.68	48.63	47.18	10.00	22943.63	1.37
48.73	47.63	10.00	23210.10	48.60	47.21	9.99	22921.12	1.25
48.85	47.60	9.98	23206.09	48.71	47.19	9.97	22917.29	1.24
48.82	47.62	9.99	23224.84	48.66	47.15	9.98	22897.30	1.41
48.87	47.65	9.98	23239.98	48.67	47.16	9.98	22906.87	1.43
Mittelwert								1.12
Standartabweichung								0.41

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
111	24h/180°C	16.01	15.44	3.53
112	24h/180°C	15.69	15.11	3.67
113	24h/180°C	16.36	15.76	3.69
114	24h/180°C	16.29	15.68	3.72
115	24h/180°C	16.41	15.81	3.64
116	24h/180°C	16.20	15.65	3.40
117	24h/180°C	16.34	15.81	3.28
118	24h/180°C	16.22	15.69	3.28
119	24h/180°C	15.87	15.33	3.37
120	24h/180°C	16.25	15.69	3.40
Mittelwert				3.50
Standartabweichung				0.17

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.77	47.97	10.03	23465.15	48.50	47.25	10.01	22939.17	2.24
48.88	47.88	10.04	23497.36	48.56	47.09	10.04	22958.37	2.29
48.88	47.66	9.99	23272.91	48.55	46.83	10.01	22758.70	2.21
48.87	47.63	9.95	23160.48	48.54	46.73	9.95	22569.33	2.55
48.85	47.60	10.01	23275.85	48.47	46.80	9.98	22638.59	2.74
48.86	47.63	10.01	23295.29	48.57	46.77	10.01	22738.91	2.39
48.86	47.64	9.97	23207.07	48.56	46.92	9.96	22693.21	2.21
48.83	47.61	9.98	23201.47	48.54	46.89	9.95	22646.60	2.39
48.90	47.61	10.00	23281.29	48.54	46.80	10.00	22716.72	2.42
48.84	47.50	10.00	23199.00	48.56	46.77	10.00	22711.51	2.10
Mittelwert								2.36
Standartabweichung								0.19

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
31	6h/200°C	16.23	14.99	7.64
32	6h/200°C	15.98	14.85	7.07
33	6h/200°C	16.23	14.95	7.89
34	6h/200°C	16.10	14.71	8.63
35	6h/200°C	16.38	15.24	6.96
Mittelwert				7.64
Standartabweichung				0.68

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.77	47.60	9.95	23098.45	48.11	45.78	10.02	22068.81	4.46
48.79	47.55	9.95	23083.65	48.12	45.77	10.00	22024.52	4.59
48.74	47.54	9.98	23124.65	48.04	45.61	10.10	22130.15	4.30
48.83	47.54	9.96	23120.93	47.95	45.62	10.11	22115.41	4.35
48.92	47.58	10.03	23345.96	48.11	45.83	9.97	21982.67	5.84
Mittelwert								4.77
Standartabweichung								0.72

PrNr	Serie	Masse	Masse	Dm in %
131	6h/160°C	16.15	16.05	0.62
132	6h/160°C	16.26	16.17	0.55
133	6h/160°C	16.03	15.93	0.62
134	6h/160°C	15.73	15.64	0.57
135	6h/160°C	15.97	15.88	0.56
136	6h/160°C	16.19	16.10	0.56
137	6h/160°C	16.22	16.13	0.55
138	6h/160°C	16.11	16.03	0.50
139	6h/160°C	15.91	15.81	0.63
140	6h/160°C	16.31	16.21	0.61
Mittelwert				0.58
Standartabweichung				0.04

radial	tangential	longitudinal	Darrvolumen	radial	tangential	longitudinal	Volumen	DV in %
48.75	47.48	9.96	23053.31	48.71	47.35	9.95	22948.86	0.46
48.80	47.71	9.98	23235.92	48.75	47.58	9.96	23102.47	0.57
48.87	47.70	9.97	23241.06	48.79	47.57	9.96	23116.57	0.54
48.88	47.72	9.98	23278.88	48.87	47.59	9.97	23187.46	0.39
48.93	47.65	10.00	23315.15	48.79	47.53	10.00	23189.89	0.54
48.86	47.58	9.98	23201.09	48.81	47.45	9.99	23137.18	0.28
48.83	47.60	9.97	23173.35	48.79	47.44	9.97	23076.54	0.42
48.83	47.56	9.94	23084.21	48.77	47.42	9.95	23011.10	0.32
48.90	47.67	9.99	23287.32	48.83	47.54	9.99	23190.57	0.42
48.82	47.56	10.02	23265.23	48.78	47.42	10.02	23177.74	0.38
Mittelwert								0.43
Standartabweichung								0.10

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]
91	24h/160°C	16.15	15.94	1.31
92	24h/160°C	16.14	15.96	1.15
93	24h/160°C	15.74	15.55	1.19
94	24h/160°C	16.33	16.15	1.10
95	24h/160°C	15.86	15.68	1.11
96	24h/160°C	16.32	16.13	1.18
97	24h/160°C	16.38	16.20	1.15
98	24h/160°C	16.39	16.20	1.17
99	24h/160°C	16.36	16.17	1.19
100	24h/160°C	16.45	16.27	1.12
Mittelwert				1.17
Standartabweichung				0.06

Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
48.92	47.67	9.96	23226.88	48.76	47.36	9.97	23023.46	0.88
48.83	47.64	10.01	23285.87	48.87	47.41	10.00	23169.27	0.50
49.02	47.76	9.97	23341.72	48.80	47.54	9.97	23129.92	0.91
48.83	47.64	10.00	23262.61	48.71	47.30	9.99	23016.79	1.06
48.79	47.82	10.04	23424.70	48.70	47.56	10.04	23254.37	0.73
48.80	47.67	10.00	23262.96	48.63	47.33	10.01	23039.60	0.96
48.83	47.67	9.99	23253.98	48.74	47.39	10.00	23097.89	0.67
48.84	47.70	10.01	23319.98	48.73	47.42	10.02	23153.98	0.71
48.82	47.59	9.98	23186.97	48.72	47.33	9.99	23036.12	0.65
48.76	47.61	10.00	23214.64	48.71	47.46	10.00	23117.77	0.42
Mittelwert								0.75
Standartabweichung								0.20

Tabelle A-24: Masseänderung und Volumenänderung von Esche ohne Braunkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]	Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]	
241	6h/200°C	14.43	13.13	9.07	49.36	48.84	10.01	24131.53	48.76	47.78	10.03	23367.42	3.17	
242	6h/200°C	14.45	13.13	9.15	49.35	48.80	10.01	24106.88	48.74	47.71	10.03	23323.62	3.25	
243	6h/200°C	14.46	13.14	9.13	49.34	48.86	10.01	24131.63	48.89	47.69	10.02	23362.27	3.19	
244	6h/200°C	14.47	13.17	9.01	49.36	48.81	10.00	24092.62	48.89	47.77	10.03	23424.82	2.77	
245	6h/200°C	14.53	13.24	8.82	49.38	48.98	10.00	24186.32	48.84	47.86	10.00	23384.59	3.31	
246	6h/200°C	14.53	13.26	8.75	49.33	48.83	10.00	24087.84	47.78	48.87	10.01	23373.44	2.97	
247	6h/200°C	14.46	13.20	8.72	49.33	48.76	10.00	24053.31	48.81	47.67	10.02	23314.26	3.07	
248	6h/200°C	14.45	13.15	9.01	49.32	48.77	10.00	24053.36	48.77	47.67	10.01	23271.91	3.25	
249	6h/200°C	14.45	13.16	8.92	49.34	48.85	10.01	24126.69	48.78	47.80	10.10	23550.01	2.39	
250	6h/200°C	14.51	13.24	8.77	49.34	48.77	10.00	24063.12	48.82	47.68	10.04	23370.49	2.88	
Mittelwert				8.92									Mittelwert	3.02
Standartabweichung				0.16									Standartabweichung	0.28
261	12h/200°C	14.49	12.44	14.21	49.33	48.87	10.05	24228.11	48.29	46.81	10.02	22649.76	6.51	
262	12h/200°C	14.48	12.46	13.97	49.34	48.86	10.04	24203.95	48.38	46.77	10.04	22717.84	6.14	
263	12h/200°C	14.50	12.92	10.86	49.36	48.85	10.03	24184.70	48.67	47.45	10.04	23186.29	4.13	
264	12h/200°C	14.34	12.57	12.34	49.35	48.86	10.03	24184.75	48.60	47.35	10.05	23127.16	4.37	
265	12h/200°C	14.36	12.35	13.97	49.36	48.88	10.03	24199.55	48.45	46.87	10.03	22776.64	5.88	
266	12h/200°C	14.47	12.38	14.47	49.32	48.84	10.04	24184.24	48.37	46.79	10.06	22768.12	5.86	
267	12h/200°C	14.41	12.35	14.29	49.38	48.86	10.04	24223.58	48.38	46.78	10.04	22722.69	6.20	
268	12h/200°C	14.53	12.50	13.99	49.33	48.80	10.01	24097.11	48.37	46.69	10.03	22651.70	6.00	
269	12h/200°C	14.46	12.42	14.15	49.30	48.87	10.03	24165.19	48.35	46.72	10.03	22656.89	6.24	
270	12h/200°C	14.68	12.64	13.92	49.27	48.84	9.98	24015.34	48.24	46.70	10.00	22528.08	6.19	
Mittelwert				13.62									Mittelwert	5.75
Standartabweichung				1.13									Standartabweichung	0.82
281	24h/200°C	14.45	11.75	18.71	49.28	48.77	10.02	24081.92	47.75	45.58	10.02	21807.98	9.44	
282	24h/200°C	14.48	11.50	20.57	49.27	48.74	10.03	24086.24	47.53	45.25	10.03	21571.85	10.44	
283	24h/200°C	14.42	11.27	21.84	49.26	48.75	10.03	24086.29	47.35	44.90	10.04	21345.19	11.38	
284	24h/200°C	14.42	11.13	22.86	49.27	48.77	10.05	24149.12	47.23	44.82	10.01	21189.65	12.25	
285	24h/200°C	14.41	12.19	15.44	49.29	48.80	9.98	24005.41	48.14	46.33	10.02	22347.87	6.90	
286	24h/200°C	14.50	12.22	15.74	49.32	48.83	10.04	24179.29	48.12	46.32	10.40	23180.75	4.13	
287	24h/200°C	14.45	12.07	16.45	49.32	48.81	10.06	24217.53	48.03	46.06	10.08	22299.60	7.92	
288	24h/200°C	14.52	11.97	17.61	49.32	48.81	10.05	24193.46	47.85	45.97	10.06	22128.62	8.53	
289	24h/200°C	14.45	11.60	19.73	49.37	48.86	10.01	24146.30	47.64	45.56	10.00	21704.78	10.11	
290	24h/200°C	14.40	11.32	21.41	49.31	48.80	10.03	24135.47	47.44	45.10	10.02	21438.23	11.18	
Mittelwert				19.04									Mittelwert	9.23
Standartabweichung				2.66									Standartabweichung	2.44
321	24h/180°C	14.35	13.30	7.28	49.38	48.84	10.02	24165.43	48.97	47.83	10.04	23516.04	2.69	
322	24h/180°C	14.29	13.27	7.11	49.36	48.83	10.03	24174.80	48.99	47.89	10.03	23531.69	2.66	
323	24h/180°C	14.35	13.36	6.93	49.37	48.87	10.03	24199.50	48.97	47.91	10.04	23555.37	2.66	
324	24h/180°C	14.36	13.37	6.85	49.41	48.94	10.03	24253.80	49.00	47.93	10.03	23556.16	2.88	
325	24h/180°C	14.33	13.34	6.93	49.35	48.89	10.03	24199.60	48.98	47.93	10.04	23570.02	2.60	
326	24h/180°C	14.33	13.33	6.96	49.36	48.83	10.04	24198.90	48.93	47.91	10.05	23559.57	2.64	
327	24h/180°C	14.35	13.35	7.01	49.35	48.83	10.03	24169.90	48.93	47.85	10.03	23483.24	2.84	
328	24h/180°C	14.31	13.29	7.14	49.35	48.81	10.03	24160.00	48.92	47.80	10.04	23477.30	2.83	
329	24h/180°C	14.28	13.26	7.10	49.34	48.86	10.01	24131.63	48.91	47.81	10.03	23454.02	2.81	
330	24h/180°C	14.34	13.33	7.06	49.33	48.86	10.03	24174.95	48.87	47.78	10.03	23420.14	3.12	
Mittelwert				7.04									Mittelwert	2.77
Standartabweichung				0.13									Standartabweichung	0.16
301	24h/160°C	14.24	13.97	1.85	49.40	48.96	9.99	24162.05	49.39	48.96	9.99	24157.16	0.02	
302	24h/160°C	14.27	14.01	1.80	49.42	49.02	10.02	24274.14	49.40	48.97	10.03	24263.75	0.04	
303	24h/160°C	14.27	14.02	1.79	49.42	49.05	9.99	24216.27	49.40	48.96	10.01	24210.43	0.02	
304	24h/160°C	14.18	13.92	1.84	49.43	49.12	10.01	24304.30	49.42	49.00	10.01	24240.02	0.26	
305	24h/160°C	14.20	13.94	1.83	49.43	49.01	10.00	24225.64	49.43	48.97	10.01	24230.08	-0.02	
306	24h/160°C	14.11	13.85	1.86	49.44	49.00	10.01	24249.83	49.41	48.97	10.02	24244.47	0.02	
307	24h/160°C	14.34	14.08	1.85	49.42	48.99	10.01	24235.07	49.41	48.98	10.01	24225.22	0.04	
308	24h/160°C	14.20	13.93	1.88	49.40	49.02	9.98	24167.45	49.40	48.98	9.99	24171.92	-0.02	
309	24h/160°C	14.18	13.92	1.83	49.45	49.00	9.99	24206.27	49.36	48.94	10.00	24156.78	0.20	
310	24h/160°C	14.26	13.98	1.98	49.37	48.99	10.02	24234.74	49.32	48.83	10.00	24082.96	0.63	
Mittelwert				1.85									Mittelwert	0.12
Standartabweichung				0.05									Standartabweichung	0.20

Tabelle A-25: Masseänderung und Volumenänderung von Esche mit Braunkern. 1 = vor der thermischen Behandlung, 2 = nach der thermischen Behandlung

PrNr	Serie	Masse 1 [g]	Masse 2 [g]	Δm [%]	Höhe 1 [mm]	Breite 1 [mm]	Länge 1 [mm]	Darrvolumen 1 [mm ³]	Höhe 2 [mm]	Breite 2 [mm]	Länge 2 [mm]	Darrvolumen 2 [mm ³]	ΔV [%]
251	6h/200°C	14.56	13.50	7.24	49.29	48.82	9.99	24039.31	48.74	47.70	10.00	23248.98	3.29
252	6h/200°C	14.59	13.55	7.13	49.33	48.83	10.03	24160.10	48.70	47.61	10.03	23255.63	3.74
253	6h/200°C	14.57	13.57	6.83	49.29	48.82	9.98	24015.25	48.71	47.64	10.01	23228.65	3.28
254	6h/200°C	14.64	13.66	6.69	49.32	48.83	10.03	24155.20	48.74	47.60	10.03	23269.84	3.67
255	6h/200°C	14.62	13.54	7.41	49.27	48.82	10.01	24077.67	48.63	47.52	10.02	23155.19	3.83
256	6h/200°C	14.66	13.58	7.31	49.27	48.87	9.97	24006.01	48.65	47.60	9.99	23134.24	3.63
257	6h/200°C	14.77	13.68	7.33	49.27	48.82	10.03	24125.77	48.64	47.56	10.04	23225.72	3.73
258	6h/200°C	14.77	13.72	7.11	49.29	48.80	10.02	24101.63	48.68	47.64	10.04	23283.92	3.39
259	6h/200°C	14.64	13.64	6.84	49.29	48.83	10.03	24140.51	48.75	47.62	10.01	23237.96	3.74
260	6h/200°C	14.62	13.68	6.43	49.28	48.83	10.02	24111.55	48.78	47.67	10.02	23299.93	3.77
				Mittelwert								Mittelwert	3.57
				Standartabweichung								Standartabweichung	0.21
271	12h/200°C	15.19	13.47	11.27	49.18	48.89	10.01	24068.15	48.09	46.98	10.02	22637.87	5.94
272	12h/200°C	15.27	13.63	10.73	49.20	48.87	10.00	24044.04	48.20	47.12	10.01	22734.55	5.45
273	12h/200°C	14.84	13.22	10.91	49.34	48.79	10.06	24217.42	48.39	46.88	10.06	22821.34	5.76
274	12h/200°C	14.74	13.07	11.32	49.28	48.80	9.98	24000.54	48.28	46.77	9.98	22535.39	6.10
275	12h/200°C	14.78	13.33	9.77	49.30	48.86	10.00	24087.98	48.45	47.11	10.01	22847.62	5.15
276	12h/200°C	14.70	13.10	10.90	49.28	48.85	9.99	24049.21	48.39	46.94	10.01	22736.98	5.46
277	12h/200°C	14.74	13.01	11.79	49.28	48.84	10.00	24068.35	48.24	46.79	10.01	22594.07	6.13
278	12h/200°C	14.74	12.94	12.21	49.32	48.88	10.00	24107.62	48.21	46.71	10.01	22541.41	6.50
279	12h/200°C	14.68	12.88	12.21	49.30	48.84	10.00	24078.12	48.21	46.57	10.02	22496.30	6.57
280	12h/200°C	14.51	12.77	12.02	49.31	48.89	9.97	24035.34	48.22	46.55	9.98	22401.52	6.80
				Mittelwert								Mittelwert	5.99
				Standartabweichung								Standartabweichung	0.54
291	24h/200°C	14.99	11.96	20.21	49.18	48.75	10.00	23975.25	46.92	44.75	10.08	21164.67	11.72
292	24h/200°C	14.92	11.81	20.82	49.16	48.70	10.01	23964.86	46.86	44.67	9.98	20990.50	12.83
293	24h/200°C	15.05	13.32	11.52	49.19	48.72	10.00	23965.37	48.14	46.69	10.05	22588.95	5.74
294	24h/200°C	15.03	13.04	13.27	49.20	48.74	10.02	24028.04	47.80	46.32	10.05	22251.66	7.39
295	24h/200°C	14.98	12.81	14.45	49.16	48.76	10.00	23970.42	47.75	45.99	10.02	22004.15	8.20
296	24h/200°C	14.92	12.46	16.51	49.11	48.71	10.00	23921.48	47.42	45.51	10.01	21602.42	9.69
297	24h/200°C	14.92	12.23	18.05	49.10	48.74	10.03	24003.13	47.20	45.38	10.00	21419.36	10.76
299	24h/200°C	14.97	12.06	19.45	49.18	48.73	9.99	23941.45	47.11	45.07	10.00	21232.48	11.31
300	24h/200°C	15.17	11.99	20.96	49.14	48.79	9.99	23951.43	47.10	44.86	10.00	21129.06	11.78
	24h/200°C	14.67	12.07	17.69	49.17	48.76	10.00	23975.29	46.92	44.63	9.98	20898.52	12.83
				Mittelwert								Mittelwert	10.23
				Standartabweichung								Standartabweichung	2.41
331	24h/180°C	14.79	13.89	6.11	49.17	49.00	10.02	24141.49	48.58	48.01	10.02	23369.90	3.20
332	24h/180°C	14.79	13.89	6.06	49.10	48.97	10.02	24092.36	48.66	48.05	10.03	23451.27	2.66
333	24h/180°C	14.79	13.90	6.00	49.10	49.00	10.01	24083.06	48.63	48.08	10.00	23381.30	2.91
334	24h/180°C	14.90	14.01	6.01	49.17	48.97	10.02	24126.71	48.64	48.07	10.02	23428.01	2.90
335	24h/180°C	14.72	13.78	6.39	49.21	48.99	10.02	24156.19	48.64	48.02	10.02	23403.64	3.12
336	24h/180°C	14.74	13.80	6.36	49.17	48.98	9.99	24059.38	48.65	48.01	10.00	23356.87	2.92
337	24h/180°C	14.82	13.89	6.30	49.18	48.94	10.02	24116.83	48.60	47.97	10.02	23360.05	3.14
338	24h/180°C	14.76	13.85	6.15	49.22	48.94	10.01	24112.36	48.72	48.01	10.02	23437.25	2.80
339	24h/180°C	14.90	14.00	6.05	49.24	48.96	10.01	24132.01	48.71	47.96	10.01	23384.68	3.10
340	24h/180°C	14.99	14.09	6.02	49.18	48.91	10.00	24053.94	48.68	47.95	10.00	23342.06	2.96
				Mittelwert								Mittelwert	2.97
				Standartabweichung								Standartabweichung	0.17
311	24h/160°C	14.93	14.66	1.80	49.17	48.83	9.98	23961.69	49.09	48.53	9.99	23799.55	0.68
312	24h/160°C	15.03	14.77	1.74	49.23	48.78	9.98	23966.37	49.16	48.60	9.99	23867.87	0.41
313	24h/160°C	15.00	14.75	1.68	49.21	48.81	10.00	24019.40	49.14	48.57	10.00	23867.30	0.63
314	24h/160°C	15.29	15.04	1.60	49.19	48.83	9.99	23995.46	49.13	48.62	9.99	23863.12	0.55
315	24h/160°C	14.91	14.66	1.64	49.20	48.81	9.97	23942.48	49.12	48.58	9.97	23790.91	0.63
316	24h/160°C	15.29	15.04	1.64	49.13	48.85	9.99	23976.00	49.07	48.62	9.99	23833.98	0.59
317	24h/160°C	15.28	15.01	1.78	49.15	48.82	9.99	23971.03	49.05	48.59	9.99	23809.56	0.67
318	24h/160°C	15.38	15.11	1.75	49.16	48.69	9.98	23888.13	49.07	48.48	10.00	23789.14	0.41
319	24h/160°C	15.27	15.00	1.74	49.18	48.72	10.00	23960.50	49.09	48.50	9.99	23784.84	0.73
320	24h/160°C	15.16	14.90	1.69	49.16	48.75	10.02	24013.43	49.05	48.47	10.02	23822.08	0.80
				Mittelwert								Mittelwert	0.61
				Standartabweichung								Standartabweichung	0.13

Tabelle A-26: Brinellhärte der Buchenserien bei 180°C und Werte der unbehandelten Serie in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. RK = Rotkern

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
2	unbehandelt ohne RK	26.64	24.37	57.25
3	unbehandelt ohne RK	27.77	24.10	58.03
4	unbehandelt ohne RK	26.52	25.67	58.32
5	unbehandelt ohne RK	27.52	23.94	58.77
6	unbehandelt ohne RK	25.71	24.25	61.93
7	unbehandelt ohne RK	23.33	22.65	53.87
8	unbehandelt ohne RK	29.49	23.02	55.83
9	unbehandelt ohne RK	24.87	24.06	58.24
10	unbehandelt ohne RK	27.11	21.69	52.98
Mittelwert		26.55	23.75	57.25
Standardabweichung		1.78	1.15	2.71

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
42	6h/180°C ohne RK	29.80	22.06	68.76
43	6h/180°C ohne RK	27.64	21.28	68.07
44	6h/180°C ohne RK	32.80	27.25	74.38
45	6h/180°C ohne RK	26.40	23.13	74.91
46	6h/180°C ohne RK	26.55	23.99	75.86
47	6h/180°C ohne RK	30.03	24.41	75.85
48	6h/180°C ohne RK	27.21	25.92	76.62
49	6h/180°C ohne RK	29.45	23.46	76.35
50	6h/180°C ohne RK	38.00	24.38	79.31
Mittelwert		29.76	23.99	74.46
Standardabweichung		3.71	1.83	3.69

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
61	12h/180°C ohne RK	27.98	22.57	80.86
62	12h/180°C ohne RK	30.87	22.75	82.75
63	12h/180°C ohne RK	28.97	21.01	72.37
64	12h/180°C ohne RK	28.49	26.33	85.97
65	12h/180°C ohne RK	23.61	18.47	70.49
66	12h/180°C ohne RK	29.13	20.09	72.70
67	12h/180°C ohne RK	35.48	25.45	89.80
68	12h/180°C ohne RK	24.90	18.75	70.51
69	12h/180°C ohne RK	28.77	20.07	76.12
70	12h/180°C ohne RK	38.32	29.85	86.12
Mittelwert		29.65	22.53	78.77
Standardabweichung		4.41	3.68	7.22

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
101	24h/180°C ohne RK	24.62	19.46	78.67
102	24h/180°C ohne RK	21.75	18.08	77.34
103	24h/180°C ohne RK	22.29	17.28	70.16
104	24h/180°C ohne RK	34.16	22.66	86.40
105	24h/180°C ohne RK	26.80	21.10	81.93
106	24h/180°C ohne RK	25.68	18.57	77.64
107	24h/180°C ohne RK	22.89	17.30	72.96
108	24h/180°C ohne RK	31.34	23.58	79.33
109	24h/180°C ohne RK	27.41	19.39	83.95
110	24h/180°C ohne RK	22.25	17.54	70.43
Mittelwert		25.92	19.49	77.88
Standardabweichung		4.15	2.25	5.46

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
12	unbehandelt mit RK	29.21	27.41	59.02
13	unbehandelt mit RK	30.34	31.86	71.12
14	unbehandelt mit RK	29.14	29.23	55.93
15	unbehandelt mit RK	36.21	31.45	68.30
16	unbehandelt mit RK	28.10	27.34	61.12
17	unbehandelt mit RK	30.06	28.33	60.61
18	unbehandelt mit RK	34.89	32.83	58.67
19	unbehandelt mit RK	29.85	26.92	66.07
20	unbehandelt mit RK	29.23	27.54	57.53
Mittelwert		30.78	29.21	62.04
Standardabweichung		2.80	2.26	5.23

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
52	6h/180°C mit RK	30.36	25.89	84.12
53	6h/180°C mit RK	47.46	33.09	91.40
54	6h/180°C mit RK	38.63	28.57	87.93
55	6h/180°C mit RK	31.16	28.30	84.08
56	6h/180°C mit RK	36.04	30.71	85.63
57	6h/180°C mit RK	38.25	28.87	93.33
58	6h/180°C mit RK	41.73	30.25	82.91
59	6h/180°C mit RK	33.16	28.21	76.81
60	6h/180°C mit RK	33.18	27.27	85.23
Mittelwert		36.66	29.02	85.71
Standardabweichung		5.52	2.10	4.85

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
71	12h/180°C mit RK	35.40	26.68	85.39
72	12h/180°C mit RK	40.11	29.10	98.98
73	12h/180°C mit RK	37.31	40.53	81.66
74	12h/180°C mit RK	37.99	34.15	94.20
75	12h/180°C mit RK	40.59	28.76	90.86
76	12h/180°C mit RK	31.86	30.55	86.07
77	12h/180°C mit RK	37.82	27.01	91.68
78	12h/180°C mit RK	46.26	28.29	95.09
79	12h/180°C mit RK	39.52	26.79	96.48
80	12h/180°C mit RK	33.93	27.53	85.02
Mittelwert		38.08	29.94	90.54
Standardabweichung		3.99	4.35	5.75

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
111	24h/180°C mit RK	37.75	26.46	110.54
112	24h/180°C mit RK	33.91	27.17	108.31
113	24h/180°C mit RK	35.29	27.46	108.91
114	24h/180°C mit RK	35.82	25.45	98.35
115	24h/180°C mit RK	38.90	31.28	112.77
116	24h/180°C mit RK	32.44	26.73	104.96
117	24h/180°C mit RK	31.65	25.48	99.62
118	24h/180°C mit RK	29.32	22.98	91.99
119	24h/180°C mit RK	31.05	31.98	98.04
120	24h/180°C mit RK	32.34	43.37	94.68
Mittelwert		33.85	28.76	102.82
Standardabweichung		3.06	5.72	7.20

¹ Mittelwert aus zwei Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-27: Brinellhärte der Buchenserien nach 6h Behandlungszeit in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. RK = Rotkern

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
131	6h/160°C mit RK	34.11	29.23	82.17
132	6h/160°C mit RK	39.28	31.61	84.00
133	6h/160°C mit RK	39.84	30.37	80.52
134	6h/160°C mit RK	38.68	35.49	84.92
135	6h/160°C mit RK	37.26	29.78	89.86
136	6h/160°C mit RK	35.21	28.73	89.81
137	6h/160°C mit RK	43.65	32.92	80.55
138	6h/160°C mit RK	35.64	30.77	81.57
139	6h/160°C mit RK	30.99	27.20	80.65
140	6h/160°C mit RK	40.46	31.69	84.00
Mittelwert		37.51	30.78	83.80
Standartabweichung		3.64	2.33	3.54

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
52	6h/180°C mit RK	30.36	25.89	84.12
53	6h/180°C mit RK	47.46	33.09	91.40
54	6h/180°C mit RK	38.63	28.57	87.93
55	6h/180°C mit RK	31.16	28.30	84.08
56	6h/180°C mit RK	36.04	30.71	85.63
57	6h/180°C mit RK	38.25	28.87	93.33
58	6h/180°C mit RK	41.73	30.25	82.91
59	6h/180°C mit RK	33.16	28.21	76.81
60	6h/180°C mit RK	33.18	27.27	85.23
Mittelwert		36.66	29.02	85.71
Standartabweichung		5.52	2.10	4.85

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
31	6h/200°C mit RK	30.33	28.99	92.74
32	6h/200°C mit RK	37.28	27.15	105.41
33	6h/200°C mit RK	34.26	23.29	83.63
34	6h/200°C mit RK	44.23	32.58	94.75
35	6h/200°C mit RK	34.06	30.20	92.97
36	6h/200°C mit RK	35.74	25.35	97.65
37	6h/200°C mit RK	38.81	31.13	108.09
38	6h/200°C mit RK	31.46	28.90	93.77
39	6h/200°C mit RK	35.49	29.53	97.25
40	6h/200°C mit RK	41.88	37.31	104.60
Mittelwert		36.36	29.44	97.09
Standartabweichung		4.35	3.88	7.31

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
121	6h/160°C ohne RK	36.02	30.08	73.12
122	6h/160°C ohne RK	30.82	29.07	75.28
123	6h/160°C ohne RK	33.48	28.16	73.25
124	6h/160°C ohne RK	38.41	27.77	72.00
125	6h/160°C ohne RK	35.51	28.05	72.00
126	6h/160°C ohne RK	29.86	22.44	72.95
127	6h/160°C ohne RK	32.11	27.93	72.00
128	6h/160°C ohne RK	36.79	22.55	71.97
129	6h/160°C ohne RK	38.39	29.72	82.94
130	6h/160°C ohne RK	32.00	21.65	68.59
Mittelwert		34.34	26.74	73.41
Standartabweichung		3.10	3.23	3.74

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
42	6h/180°C ohne RK	29.80	22.06	68.76
43	6h/180°C ohne RK	27.64	21.28	68.07
44	6h/180°C ohne RK	32.80	27.25	74.38
45	6h/180°C ohne RK	26.40	23.13	74.91
46	6h/180°C ohne RK	26.55	23.99	75.86
47	6h/180°C ohne RK	30.03	24.41	75.85
48	6h/180°C ohne RK	27.21	25.92	76.62
49	6h/180°C ohne RK	29.45	23.46	76.35
50	6h/180°C ohne RK	38.00	24.38	79.31
Mittelwert		29.76	23.99	74.46
Standartabweichung		3.71	1.83	3.69

PrNr	Serie	radial ¹ [N/mm ²]	tangential ¹ [N/mm ²]	longitudinal ¹ [N/mm ²]
23	6h/200°C ohne RK	28.26	19.30	85.40
25	6h/200°C ohne RK	24.89	19.58	69.08
27	6h/200°C ohne RK	33.82	23.21	86.05
28	6h/200°C ohne RK	23.22	18.27	85.96
29	6h/200°C ohne RK	26.49	18.16	70.04
Mittelwert		27.34	19.70	79.31
Standartabweichung		4.08	2.06	8.91

¹⁾ Mittelwert aus zwei Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-28: Brinellhärte der Eschenserien bei 200°C und Werte der unbehandelten Serie in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. BK = Braunkern

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
11	unbehandelt mit BK	44.24	29.14	82.68
12	unbehandelt mit BK	28.33	28.91	84.88
13	unbehandelt mit BK	41.93	31.02	80.36
14	unbehandelt mit BK	39.24	28.17	63.34
15	unbehandelt mit BK	23.72	29.72	87.63
16	unbehandelt mit BK	41.65	27.96	71.95
17	unbehandelt mit BK	34.14	29.54	81.53
18	unbehandelt mit BK	32.56	33.02	58.88
	Mittelwert	35.73	29.68	76.41
	Standardabweichung	7.27	1.65	10.54

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
31	6h/200°C mit BK	18.33	24.73	69.88
32	6h/200°C mit BK	31.92	31.44	67.33
33	6h/200°C mit BK	31.76	35.04	67.32
34	6h/200°C mit BK	33.94	33.64	100.91
35	6h/200°C mit BK	21.67	24.31	71.37
36	6h/200°C mit BK	36.47	27.72	104.40
37	6h/200°C mit BK	31.35	24.17	118.29
38	6h/200°C mit BK	36.42	23.97	98.36
39	6h/200°C mit BK	28.39	26.10	74.23
	Mittelwert	30.03	27.90	85.79
	Standardabweichung	6.28	4.36	19.58

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
52	12h/200 mit BK	31.76	26.09	61.07
53	12h/200 mit BK	27.34	35.20	73.64
54	12h/200 mit BK	32.92	26.99	81.71
58	12h/200 mit BK	24.16	27.19	74.24
59	12h/200 mit BK	34.54	28.79	72.43
60	12h/200 mit BK	36.61	27.15	83.50
	Mittelwert	31.22	28.57	74.43
	Standardabweichung	4.65	3.36	7.98

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
71	24h/200°C mit BK	22.11	22.06	65.18
72	24h/200°C mit BK	19.76	22.41	74.71
73	24h/200°C mit BK	27.80	22.46	90.81
74	24h/200°C mit BK	20.98	29.59	63.69
75	24h/200°C mit BK	23.53	20.83	75.67
76	24h/200°C mit BK	22.73	24.48	68.35
77	24h/200°C mit BK	21.23	27.63	65.76
78	24h/200°C mit BK	25.79	25.03	79.64
79	24h/200°C mit BK	28.31	25.26	63.14
80	24h/200°C mit BK	31.69	23.58	65.86
	Mittelwert	24.39	24.33	71.28
	Standardabweichung	3.86	2.69	8.89

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
1	unbehandelt ohne BK	22.85	27.49	65.83
2	unbehandelt ohne BK	21.46	27.81	71.68
3	unbehandelt ohne BK	25.73	29.02	52.37
4	unbehandelt ohne BK	28.92	28.79	52.60
5	unbehandelt ohne BK	19.38	27.43	72.22
6	unbehandelt ohne BK	27.71	27.10	61.72
7	unbehandelt ohne BK	32.91	27.26	63.46
8	unbehandelt ohne BK	34.18	28.30	58.69
	Mittelwert	26.64	27.90	62.32
	Standardabweichung	5.31	0.72	7.62

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
21	6h/200°C ohne BK	24.12	23.09	65.30
22	6h/200°C ohne BK	18.72	22.20	62.96
23	6h/200°C ohne BK	22.78	22.53	65.68
24	6h/200°C ohne BK	52.21	21.60	79.47
25	6h/200°C ohne BK	41.88	23.03	66.35
26	6h/200°C ohne BK	21.50	24.77	72.77
27	6h/200°C ohne BK	52.21	24.81	71.44
28	6h/200°C ohne BK	38.10	24.03	61.65
29	6h/200°C ohne BK	15.84	24.17	55.14
	Mittelwert	31.93	23.36	66.75
	Standardabweichung	14.35	1.15	7.06

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
45	12h/200 ohne BK	19.25	24.84	54.06
46	12h/200 ohne BK	24.46	45.25	67.32
47	12h/200 ohne BK	16.39	22.52	55.70
48	12h/200 ohne BK	15.54	23.80	65.70
49	12h/200 ohne BK	25.52	37.49	68.50
50	12h/200 ohne BK	19.02	31.29	53.01
	Mittelwert	20.03	30.86	60.71
	Standardabweichung	4.12	9.02	7.18

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
61	24h/200°C ohne BK	15.09	27.23	46.78
62	24h/200°C ohne BK	22.12	16.15	55.16
63	24h/200°C ohne BK	13.87	16.14	55.16
64	24h/200°C ohne BK	11.87	21.02	52.83
66	24h/200°C ohne BK	18.43	13.38	59.72
67	24h/200°C ohne BK	14.79	21.01	52.83
	Mittelwert	16.03	19.16	53.75
	Standardabweichung	3.67	4.97	4.24

1) Mittelwert aus zwei Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-29: Brinellhärte der Eschenserien nach 24 h Behandlungszeit in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung. BK = Braunkern

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
91	24h/160°C mit BK	32.25	34.30	103.82
92	24h/160°C mit BK	25.81	40.68	84.57
93	24h/160°C mit BK	39.84	35.58	93.92
94	24h/160°C mit BK	37.72	33.66	93.26
95	24h/160°C mit BK	57.38	34.24	79.17
96	24h/160°C mit BK	25.98	29.28	95.04
97	24h/160°C mit BK	54.97	34.24	83.36
98	24h/160°C mit BK	53.28	36.98	78.72
99	24h/160°C mit BK	54.59	33.64	77.98
100	24h/160°C mit BK	51.13	30.99	81.07
Mittelwert		43.29	34.36	87.09
Standartabweichung		12.44	3.10	8.82

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
113	24h/180°C mit BK	29.83	25.79	98.55
114	24h/180°C mit BK	49.86	34.98	93.73
115	24h/180°C mit BK	32.70	29.51	73.41
116	24h/180°C mit BK	26.84	29.22	101.26
117	24h/180°C mit BK	42.42	30.88	98.92
118	24h/180°C mit BK	29.23	27.58	81.69
119	24h/180°C mit BK	47.12	33.37	97.21
120	24h/180°C mit BK	37.62	35.65	77.32
Mittelwert		36.96	30.87	90.26
Standartabweichung		8.71	3.53	11.02

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
71	24h/200°C mit BK	22.11	22.06	65.18
72	24h/200°C mit BK	19.76	22.41	74.71
73	24h/200°C mit BK	27.80	22.46	90.81
74	24h/200°C mit BK	20.98	29.59	63.69
75	24h/200°C mit BK	23.53	20.83	75.67
76	24h/200°C mit BK	22.73	24.48	68.35
77	24h/200°C mit BK	21.23	27.63	65.76
78	24h/200°C mit BK	25.79	25.03	79.64
79	24h/200°C mit BK	28.31	25.26	63.14
80	24h/200°C mit BK	31.69	23.58	65.86
Mittelwert		24.39	24.33	71.28
Standartabweichung		3.86	2.69	8.89

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
81	24h/160°C ohne BK	45.59	34.63	66.89
82	24h/160°C ohne BK	36.75	28.38	64.40
83	24h/160°C ohne BK	25.95	29.45	65.24
84	24h/160°C ohne BK	20.31	29.52	63.49
85	24h/160°C ohne BK	30.89	29.49	61.58
86	24h/160°C ohne BK	37.67	27.35	74.75
87	24h/160°C ohne BK	37.23	32.77	78.53
88	24h/160°C ohne BK	32.91	31.89	70.95
89	24h/160°C ohne BK	36.73	26.83	72.17
90	24h/160°C ohne BK	39.29	23.63	70.86
Mittelwert		34.33	29.39	68.89
Standartabweichung		7.17	3.16	5.44

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
103	24h/180°C ohne BK	35.76	20.08	80.90
104	24h/180°C ohne BK	41.28	22.78	101.20
105	24h/180°C ohne BK	20.74	26.51	100.55
106	24h/180°C ohne BK	38.34	35.73	85.05
107	24h/180°C ohne BK	29.62	33.82	81.44
108	24h/180°C ohne BK	26.72	32.68	81.67
109	24h/180°C ohne BK	30.73	31.89	80.47
110	24h/180°C ohne BK	36.78	27.76	67.69
Mittelwert		32.49	28.91	84.87
Standartabweichung		6.80	5.56	11.12

PrNr	Serie	radial ¹⁾ [N/mm ²]	tangential ¹⁾ [N/mm ²]	longitudinal ¹⁾ [N/mm ²]
61	24h/200°C ohne BK	15.09	27.23	46.78
62	24h/200°C ohne BK	22.12	16.15	55.16
63	24h/200°C ohne BK	13.87	16.14	55.16
64	24h/200°C ohne BK	11.87	21.02	52.83
66	24h/200°C ohne BK	18.43	13.38	59.72
67	24h/200°C ohne BK	14.79	21.01	52.83
Mittelwert		16.03	19.16	53.75
Standartabweichung		3.67	4.97	4.24

¹⁾ Mittelwert aus zwei Messungen pro Prüfkörper

Tabelle A-30: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Buchenserien bei 180° C und Werte der unbehandelten Serie parallel zur Faser. RK = Rotkern

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
1	unbehandelt ohne RK	13632	118.06
2	unbehandelt ohne RK	13571	117.55
3	unbehandelt ohne RK	11690	112.50
4	unbehandelt ohne RK	12794	107.76
5	unbehandelt ohne RK	12105	109.78
6	unbehandelt ohne RK	11979	116.54
7	unbehandelt ohne RK	12099	112.83
8	unbehandelt ohne RK	11951	103.81
9	unbehandelt ohne RK	9863	92.86
10	unbehandelt ohne RK	12572	124.75
Mittelwert		12226	111.64
Standartabweichung		1068	8.86

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
21	unbehandelt mit RK	13721	119.44
22	unbehandelt mit RK	15285	124.23
23	unbehandelt mit RK	13612	109.51
24	unbehandelt mit RK	13549	128.40
25	unbehandelt mit RK	14396	114.53
26	unbehandelt mit RK	14712	119.74
27	unbehandelt mit RK	13162	118.71
28	unbehandelt mit RK	12719	112.27
29	unbehandelt mit RK	12206	107.81
30	unbehandelt mit RK	13278	115.12
Mittelwert		13664	116.98
Standartabweichung		925	6.42

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
81	6h/180°C ohne RK	13806	138.09
82	6h/180°C ohne RK	13815	122.93
83	6h/180°C ohne RK	13580	120.97
84	6h/180°C ohne RK	11779	108.57
85	6h/180°C ohne RK	11615	113.04
86	6h/180°C ohne RK	13841	124.04
87	6h/180°C ohne RK	13476	128.70
88	6h/180°C ohne RK	13839	124.38
89	6h/180°C ohne RK	12706	119.94
90	6h/180°C ohne RK	13528	128.36
Mittelwert		13199	122.90
Standartabweichung		861	8.25

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
101	6h/180°C mit RK	14580	111.31
102	6h/180°C mit RK	14886	115.85
103	6h/180°C mit RK	15806	128.42
104	6h/180°C mit RK	14779	95.94
105	6h/180°C mit RK	15312	130.83
106	6h/180°C mit RK	14462	82.72
107	6h/180°C mit RK	13652	89.25
108	6h/180°C mit RK	14155	98.13
109	6h/180°C mit RK	14757	126.79
110	6h/180°C mit RK	15804	135.57
Mittelwert		14819	111.48
Standartabweichung		682	18.96

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
121	12h/180°C ohne RK	13969	122.42
122	12h/180°C ohne RK	12749	115.97
123	12h/180°C ohne RK	13193	106.67
124	12h/180°C ohne RK	12830	99.48
125	12h/180°C ohne RK	12861	99.21
126	12h/180°C ohne RK	13246	109.25
127	12h/180°C ohne RK	13333	104.36
128	12h/180°C ohne RK	12716	100.79
129	12h/180°C ohne RK	12512	88.29
130	12h/180°C ohne RK	11493	90.20
Mittelwert		12890	103.67
Standartabweichung		643	10.58

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
141	12h/180°C mit RK	15344	130.26
142	12h/180°C mit RK	15062	121.68
143	12h/180°C mit RK	13920	117.83
144	12h/180°C mit RK	14153	94.25
145	12h/180°C mit RK	15006	128.51
146	12h/180°C mit RK	16255	134.83
147	12h/180°C mit RK	13409	88.01
148	12h/180°C mit RK	14416	127.20
149	12h/180°C mit RK	14422	92.84
150	12h/180°C mit RK	14146	124.12
Mittelwert		14613	115.95
Standartabweichung		818	17.43

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
201	24h/180°C ohne RK	13421	90.70
202	24h/180°C ohne RK	12822	83.23
203	24h/180°C ohne RK	13612	97.16
204	24h/180°C ohne RK	11063	69.83
205	24h/180°C ohne RK	13252	95.20
206	24h/180°C ohne RK	13981	109.94
207	24h/180°C ohne RK	11791	79.35
208	24h/180°C ohne RK	12358	81.70
209	24h/180°C ohne RK	12379	68.79
210	24h/180°C ohne RK	12973	53.33
Mittelwert		12765	82.92
Standartabweichung		886	16.35

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
221	24h/180°C mit RK	16189	96.87
222	24h/180°C mit RK	14511	67.83
223	24h/180°C mit RK	14715	94.29
224	24h/180°C mit RK	14458	104.11
225	24h/180°C mit RK	14915	99.73
226	24h/180°C mit RK	14358	101.98
227	24h/180°C mit RK	15709	95.00
228	24h/180°C mit RK	14622	104.64
229	24h/180°C mit RK	15961	82.41
230	24h/180°C mit RK	14697	95.34
Mittelwert		15013	94.22
Standartabweichung		675	11.26

Tabelle A-31: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Buchenserien nach 6 h Behandlungszeit parallel zur Faser. RK = Rotkern

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
241	6h/160°C ohne RK	13892	139.77
242	6h/160°C ohne RK	12670	133.41
243	6h/160°C ohne RK	13682	139.12
244	6h/160°C ohne RK	13505	128.63
245	6h/160°C ohne RK	13670	133.01
246	6h/160°C ohne RK	14008	138.69
247	6h/160°C ohne RK	13635	147.07
248	6h/160°C ohne RK	12716	134.81
249	6h/160°C ohne RK	13704	135.03
250	6h/160°C ohne RK	12279	124.10
	Mittelwert	13376	135.36
	Standartabweichung	563	6.03

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
261	6h/160°C mit RK	12853	137.54
262	6h/160°C mit RK	15691	153.37
263	6h/160°C mit RK	14223	132.15
264	6h/160°C mit RK	14004	152.10
265	6h/160°C mit RK	14120	141.77
266	6h/160°C mit RK	15452	150.13
267	6h/160°C mit RK	15414	167.44
268	6h/160°C mit RK	14497	134.87
269	6h/160°C mit RK	13930	152.53
270	6h/160°C mit RK	15036	149.84
	Mittelwert	14522	147.17
	Standartabweichung	834	10.08

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
81	6h/180°C ohne RK	13806	138.09
82	6h/180°C ohne RK	13815	122.93
83	6h/180°C ohne RK	13580	120.97
84	6h/180°C ohne RK	11779	108.57
85	6h/180°C ohne RK	11615	113.04
86	6h/180°C ohne RK	13841	124.04
87	6h/180°C ohne RK	13476	128.70
88	6h/180°C ohne RK	13839	124.38
89	6h/180°C ohne RK	12706	119.94
90	6h/180°C ohne RK	13528	128.36
	Mittelwert	13199	122.90
	Standartabweichung	861	8.25

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
101	6h/180°C mit RK	14580	111.31
102	6h/180°C mit RK	14886	115.85
103	6h/180°C mit RK	15806	128.42
104	6h/180°C mit RK	14779	95.94
105	6h/180°C mit RK	15312	130.83
106	6h/180°C mit RK	14462	82.72
107	6h/180°C mit RK	13652	89.25
108	6h/180°C mit RK	14155	98.13
109	6h/180°C mit RK	14757	126.79
110	6h/180°C mit RK	15804	135.57
	Mittelwert	14819	111.48
	Standartabweichung	682	18.96

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
41	6h/200°C ohne RK	11161	78.93
42	6h/200°C ohne RK	12889	90.77
43	6h/200°C ohne RK	13162	84.06
44	6h/200°C ohne RK	12864	71.66
45	6h/200°C ohne RK	11605	71.35
46	6h/200°C ohne RK	14117	101.41
47	6h/200°C ohne RK	13673	86.22
48	6h/200°C ohne RK	13949	105.16
49	6h/200°C ohne RK	12703	71.87
50	6h/200°C ohne RK	13084	91.25
	Mittelwert	12921	85.27
	Standartabweichung	944	12.12

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
62	6h/200°C mit RK	13100	86.14
63	6h/200°C mit RK	13565	61.57
64	6h/200°C mit RK	15096	104.10
65	6h/200°C mit RK	14522	86.77
66	6h/200°C mit RK	14981	99.53
67	6h/200°C mit RK	15698	96.44
68	6h/200°C mit RK	15957	98.49
69	6h/200°C mit RK	16329	97.29
70	6h/200°C mit RK	17460	123.75
	Mittelwert	15190	94.90
	Standartabweichung	1360	16.63

Tabelle A-32: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Eschenserien bei 200° C und Werte der unbehandelten Serie parallel zur Faser. BK = Braunkern

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
1	unbehandelt ohne BK	9217	99.89
2	unbehandelt ohne BK	11380	116.61
3	unbehandelt ohne BK	11699	117.93
4	unbehandelt ohne BK	12042	122.11
5	unbehandelt ohne BK	11646	111.27
6	unbehandelt ohne BK	10767	106.64
7	unbehandelt ohne BK	10296	99.43
8	unbehandelt ohne BK	10487	106.13
9	unbehandelt ohne BK	10297	106.28
10	unbehandelt ohne BK	9797	97.35
Mittelwert		10763	108.36
Standartabweichung		913	8.45

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
21	unbehandelt mit BK	13395	122.00
22	unbehandelt mit BK	13731	138.12
23	unbehandelt mit BK	12689	130.99
24	unbehandelt mit BK	12945	123.19
25	unbehandelt mit BK	13144	135.16
26	unbehandelt mit BK	13669	131.87
27	unbehandelt mit BK	12758	114.64
28	unbehandelt mit BK	12479	121.43
29	unbehandelt mit BK	13014	120.61
30	unbehandelt mit BK	13741	130.78
Mittelwert		13157	126.88
Standartabweichung		459	7.51

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
41	6h/200°C ohne BK	10265	66.10
42	6h/200°C ohne BK	11562	85.79
43	6h/200°C ohne BK	10350	81.66
44	6h/200°C ohne BK	11231	79.66
45	6h/200°C ohne BK	10169	71.23
46	6h/200°C ohne BK	10185	79.26
47	6h/200°C ohne BK	10145	77.47
48	6h/200°C ohne BK	9768	76.46
49	6h/200°C ohne BK	12156	88.37
50	6h/200°C ohne BK	12272	88.01
Mittelwert		10810	79.40
Standartabweichung		915	7.12

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
61	6h/200°C mit BK	14141	96.22
62	6h/200°C mit BK	13799	89.96
63	6h/200°C mit BK	14608	94.93
64	6h/200°C mit BK	13621	98.11
65	6h/200°C mit BK	12666	92.52
66	6h/200°C mit BK	14997	100.63
67	6h/200°C mit BK	15441	86.93
68	6h/200°C mit BK	13224	87.03
69	6h/200°C mit BK	13410	100.10
70	6h/200°C mit BK	13459	104.01
Mittelwert		13937	95.05
Standartabweichung		858	5.87

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
81	12h/200°C ohne BK	11879	71.43
82	12h/200°C ohne BK	11431	61.48
83	12h/200°C ohne BK	9975	63.14
84	12h/200°C ohne BK	7415	47.47
85	12h/200°C ohne BK	9266	56.95
86	12h/200°C ohne BK	6817	43.57
87	12h/200°C ohne BK	9121	48.96
88	12h/200°C ohne BK	8981	55.96
89	12h/200°C ohne BK	10769	66.95
90	12h/200°C ohne BK	10470	55.23
Mittelwert		9612	57.11
Standartabweichung		1635	8.85

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
101	12h/200°C mit BK	12976	72.05
102	12h/200°C mit BK	13693	89.52
103	12h/200°C mit BK	13283	78.52
104	12h/200°C mit BK	14953	66.23
105	12h/200°C mit BK	14136	75.62
106	12h/200°C mit BK	12999	66.29
107	12h/200°C mit BK	15607	68.74
108	12h/200°C mit BK	13388	75.62
109	12h/200°C mit BK	11004	72.40
110	12h/200°C mit BK	12347	79.37
Mittelwert		13438	74.44
Standartabweichung		1295	7.05

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
121	24h/200°C ohne BK	9275	39.86
122	24h/200°C ohne BK	9264	42.48
123	24h/200°C ohne BK	9672	49.00
124	24h/200°C ohne BK	9630	36.25
125	24h/200°C ohne BK	7771	38.82
126	24h/200°C ohne BK	9201	36.03
127	24h/200°C ohne BK	6604	32.67
128	24h/200°C ohne BK	9592	41.56
129	24h/200°C ohne BK	10300	57.07
130	24h/200°C ohne BK	10046	38.89
Mittelwert		9136	41.26
Standartabweichung		1117	7.08

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
141	24h/200°C mit BK	9738	40.80
142	24h/200°C mit BK	13880	50.34
143	24h/200°C mit BK	13639	60.30
144	24h/200°C mit BK	13066	67.59
145	24h/200°C mit BK	11752	57.18
147	24h/200°C mit BK	13993	101.31
148	24h/200°C mit BK	9737	51.36
149	24h/200°C mit BK	10919	52.41
150	24h/200°C mit BK	9024	42.55
Mittelwert		11750	58.21
Standartabweichung		1971	18.17

Tabelle A-33: Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul der Eschenserien nach 24 h Behandlungszeit parallel zur Faser. BK = Braunkern

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
161	24h/160°C ohne BK	9990	92.20
162	24h/160°C ohne BK	9865	89.05
163	24h/160°C ohne BK	11111	100.57
164	24h/160°C ohne BK	10457	94.06
165	24h/160°C ohne BK	10442	101.94
166	24h/160°C ohne BK	11712	110.07
167	24h/160°C ohne BK	10690	106.37
168	24h/160°C ohne BK	9553	91.89
169	24h/160°C ohne BK	11175	111.81
170	24h/160°C ohne BK	11148	107.64
	Mittelwert	10614	100.56
	Standartabweichung	682	8.32

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
181	24h/160°C mit BK	13381	116.89
182	24h/160°C mit BK	13487	129.21
183	24h/160°C mit BK	13669	119.08
184	24h/160°C mit BK	14235	132.01
185	24h/160°C mit BK	13036	121.60
186	24h/160°C mit BK	13853	119.76
187	24h/160°C mit BK	14142	129.64
188	24h/160°C mit BK	13727	118.97
189	24h/160°C mit BK	14571	128.13
190	24h/160°C mit BK	13581	122.15
	Mittelwert	13768	123.74
	Standartabweichung	450	5.44

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
201	24h/180°C ohne BK	10688	85.65
202	24h/180°C ohne BK	12959	106.01
203	24h/180°C ohne BK	10742	78.50
204	24h/180°C ohne BK	10959	81.92
205	24h/180°C ohne BK	11111	91.98
206	24h/180°C ohne BK	11886	87.23
207	24h/180°C ohne BK	10736	84.45
208	24h/180°C ohne BK	11118	88.27
209	24h/180°C ohne BK	10725	88.06
210	24h/180°C ohne BK	10829	80.79
	Mittelwert	11175	87.29
	Standartabweichung	721	7.70

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
221	24h/180°C mit BK	14014	96.49
222	24h/180°C mit BK	12817	93.45
223	24h/180°C mit BK	13486	80.65
224	24h/180°C mit BK	13839	97.14
225	24h/180°C mit BK	12732	87.02
226	24h/180°C mit BK	14348	103.39
227	24h/180°C mit BK	13343	99.63
228	24h/180°C mit BK	15255	109.94
229	24h/180°C mit BK	11505	93.71
230	24h/180°C mit BK	13091	86.19
	Mittelwert	13443	94.76
	Standartabweichung	1021	8.64

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
121	24h/200°C ohne BK	9275	39.86
122	24h/200°C ohne BK	9264	42.48
123	24h/200°C ohne BK	9672	49.00
124	24h/200°C ohne BK	9630	36.25
125	24h/200°C ohne BK	7771	38.82
126	24h/200°C ohne BK	9201	36.03
127	24h/200°C ohne BK	6604	32.67
128	24h/200°C ohne BK	9592	41.56
129	24h/200°C ohne BK	10300	57.07
130	24h/200°C ohne BK	10046	38.89
	Mittelwert	9136	41.26
	Standartabweichung	1117	7.08

PrNr	Serie	E-Mod. [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]
141	24h/200°C ohne BK	9738	40.80
142	24h/200°C ohne BK	13880	50.34
143	24h/200°C ohne BK	13639	60.30
144	24h/200°C ohne BK	13066	67.59
145	24h/200°C ohne BK	11752	57.18
147	24h/200°C ohne BK	13993	101.31
148	24h/200°C ohne BK	9737	51.36
149	24h/200°C ohne BK	10919	52.41
150	24h/200°C ohne BK	9024	42.55
	Mittelwert	11750	58.21
	Standartabweichung	1971	18.17

A 5 Diagramme der mechanischen Prüfungen

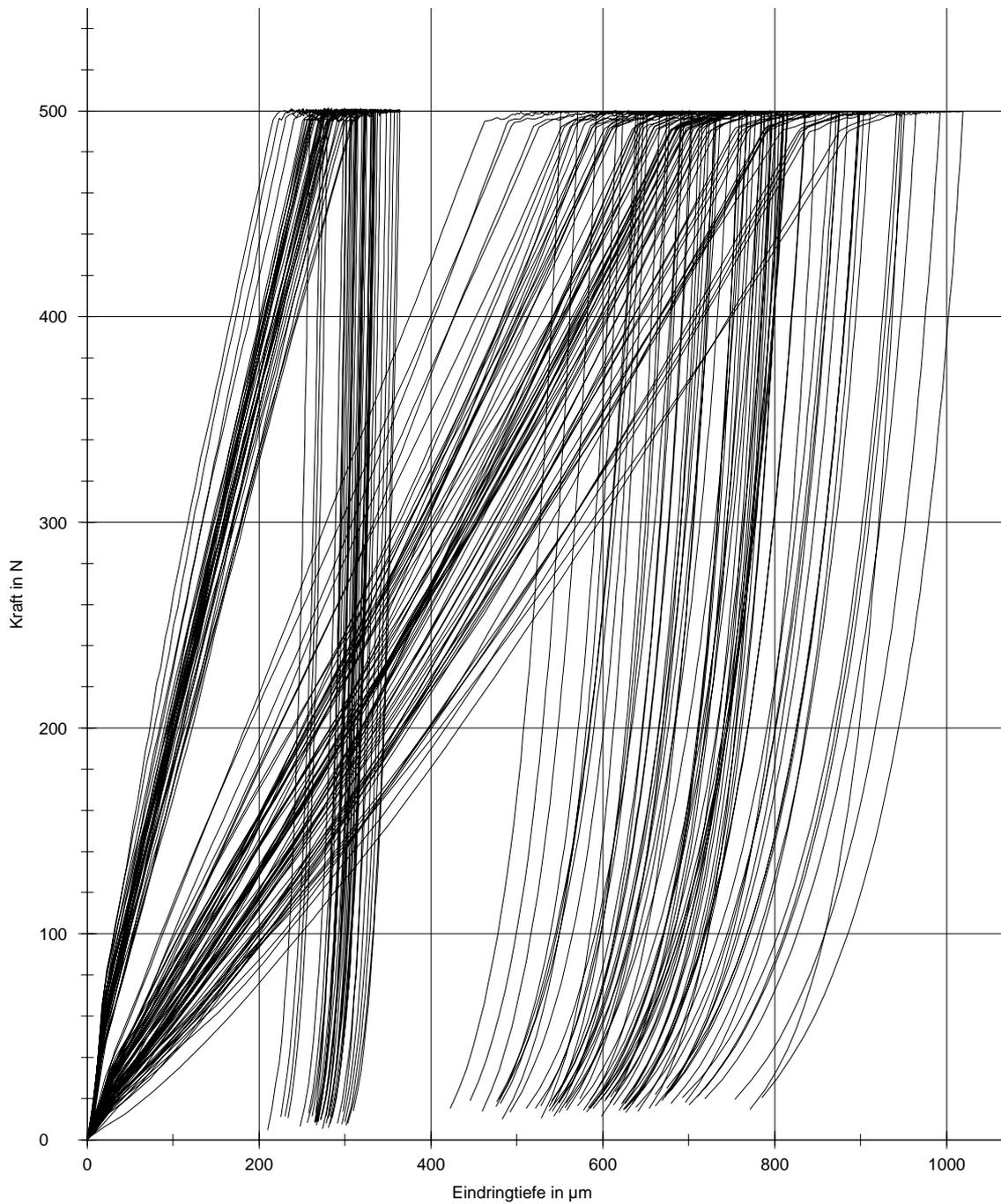


Diagramm A-2: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von unbehandelter Buche

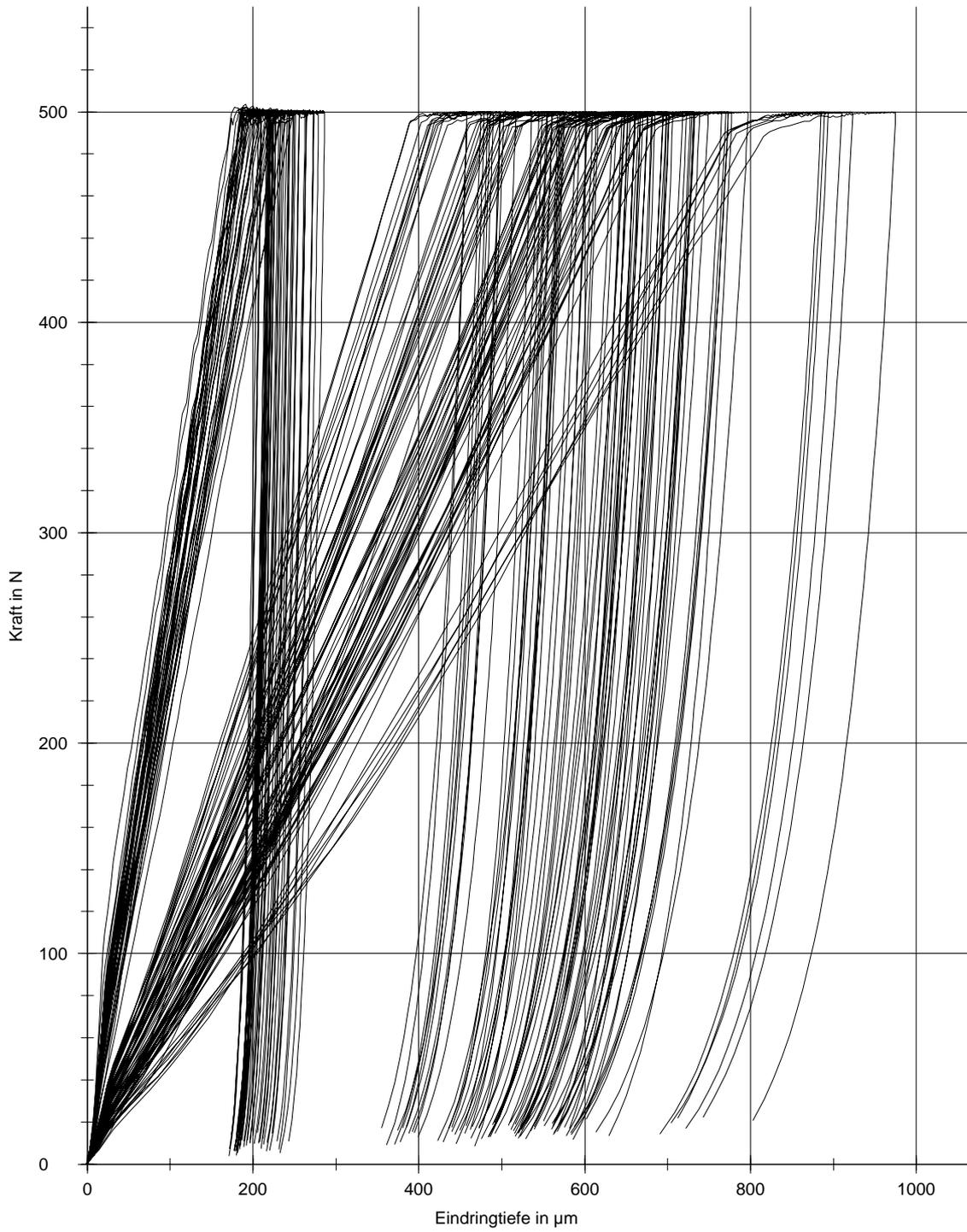


Diagramm A-3: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/160°C

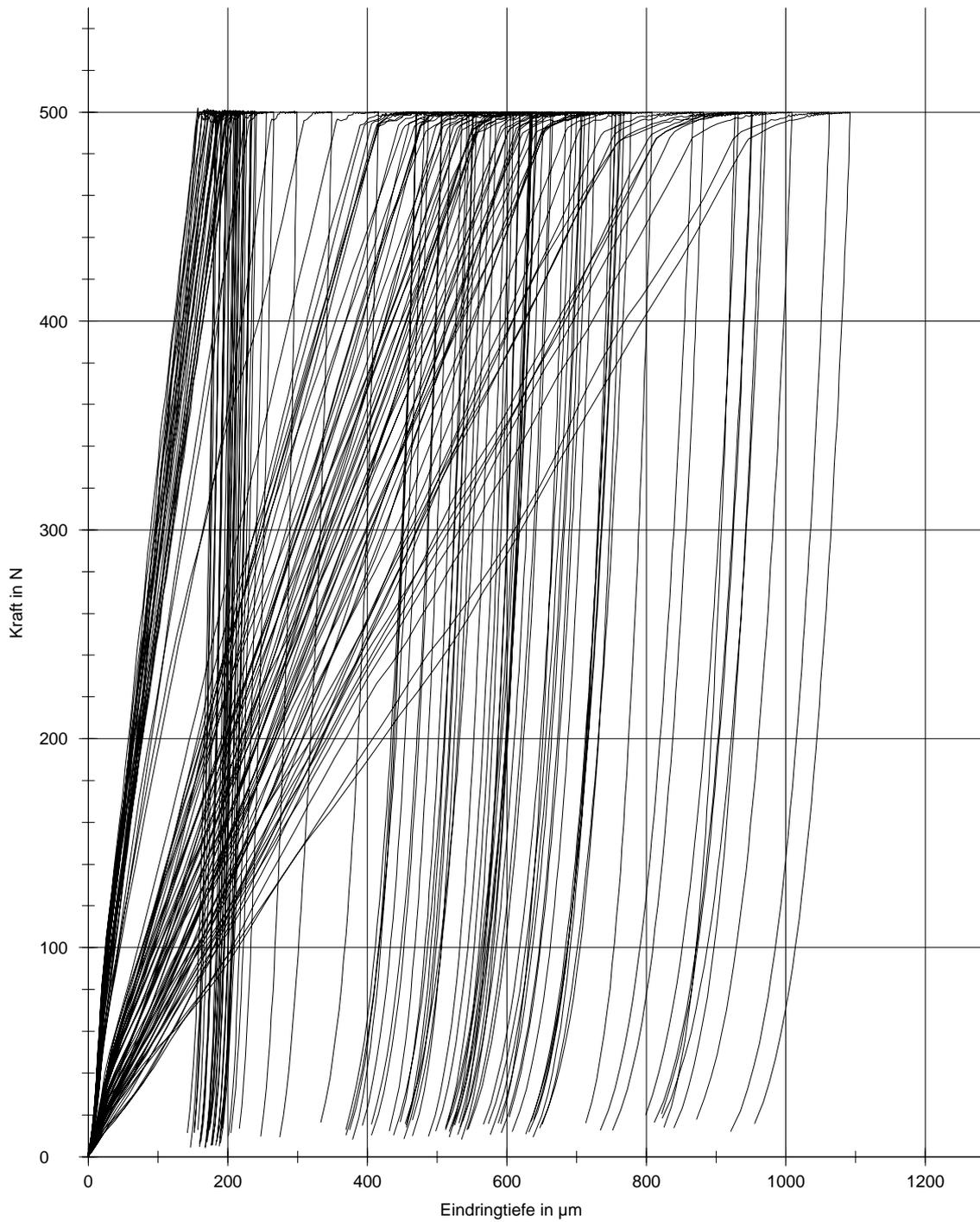


Diagramm A-4: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/200°C

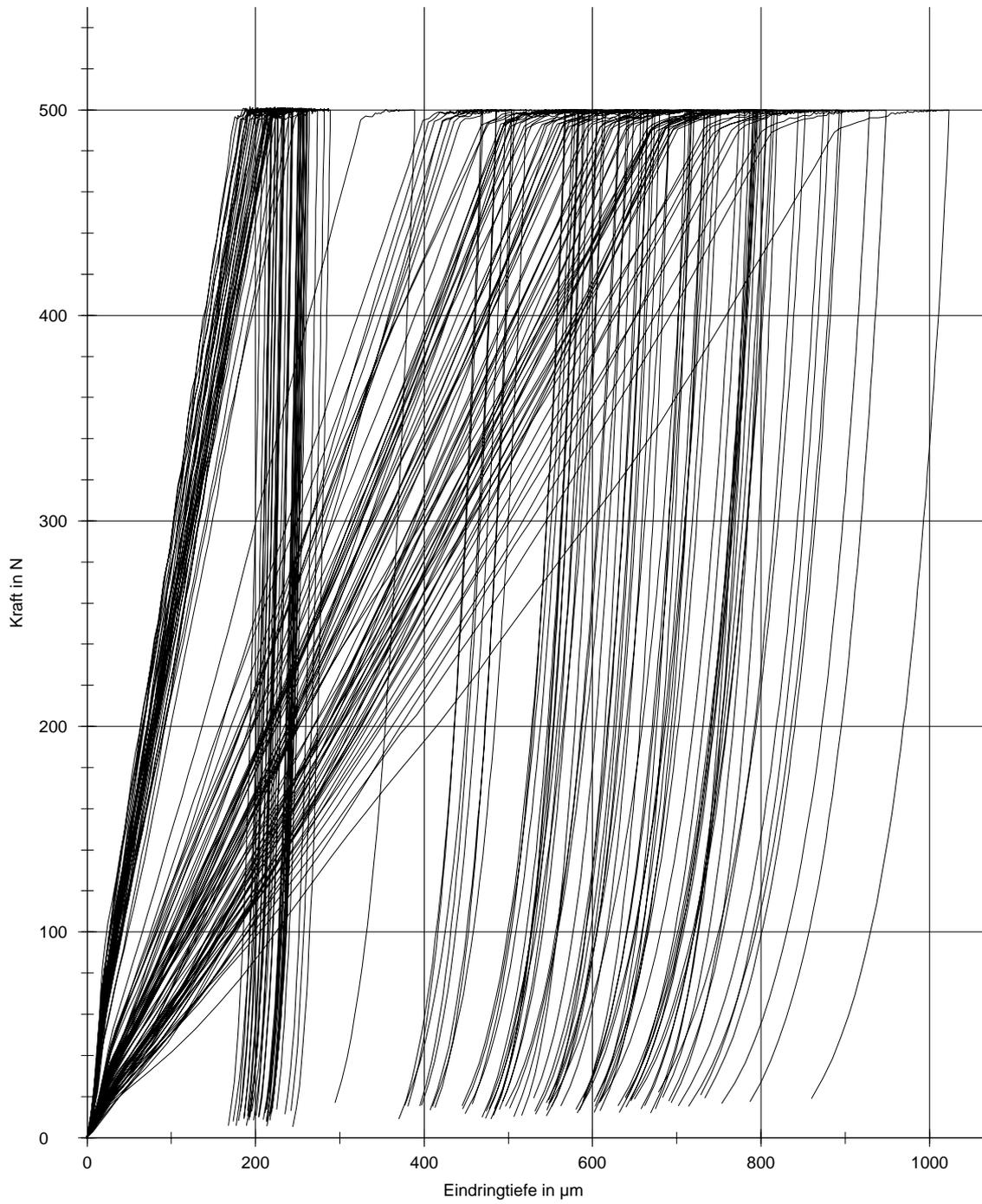


Diagramm A-5: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 6h/180°C

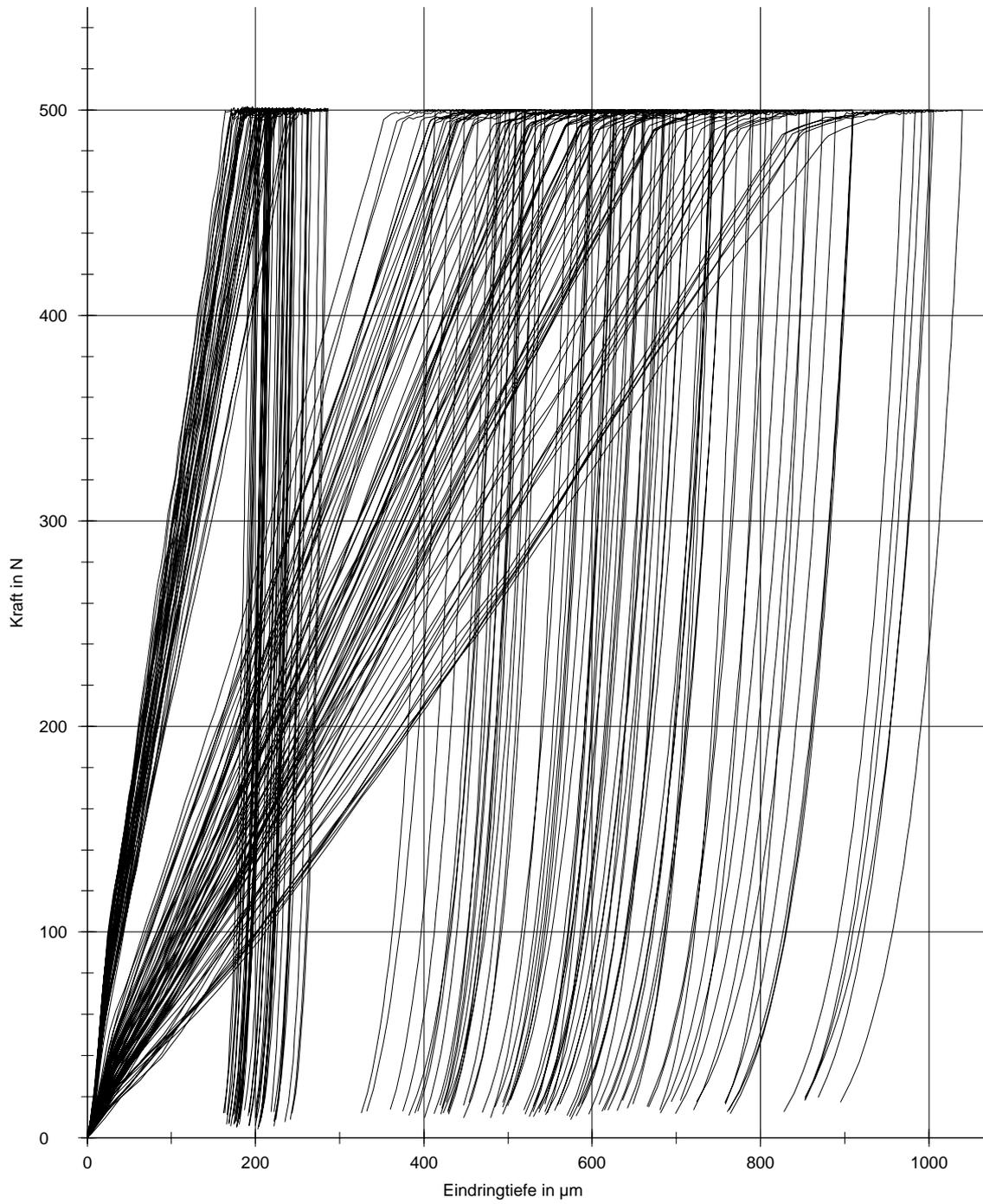


Diagramm A-6: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 12h/180°C

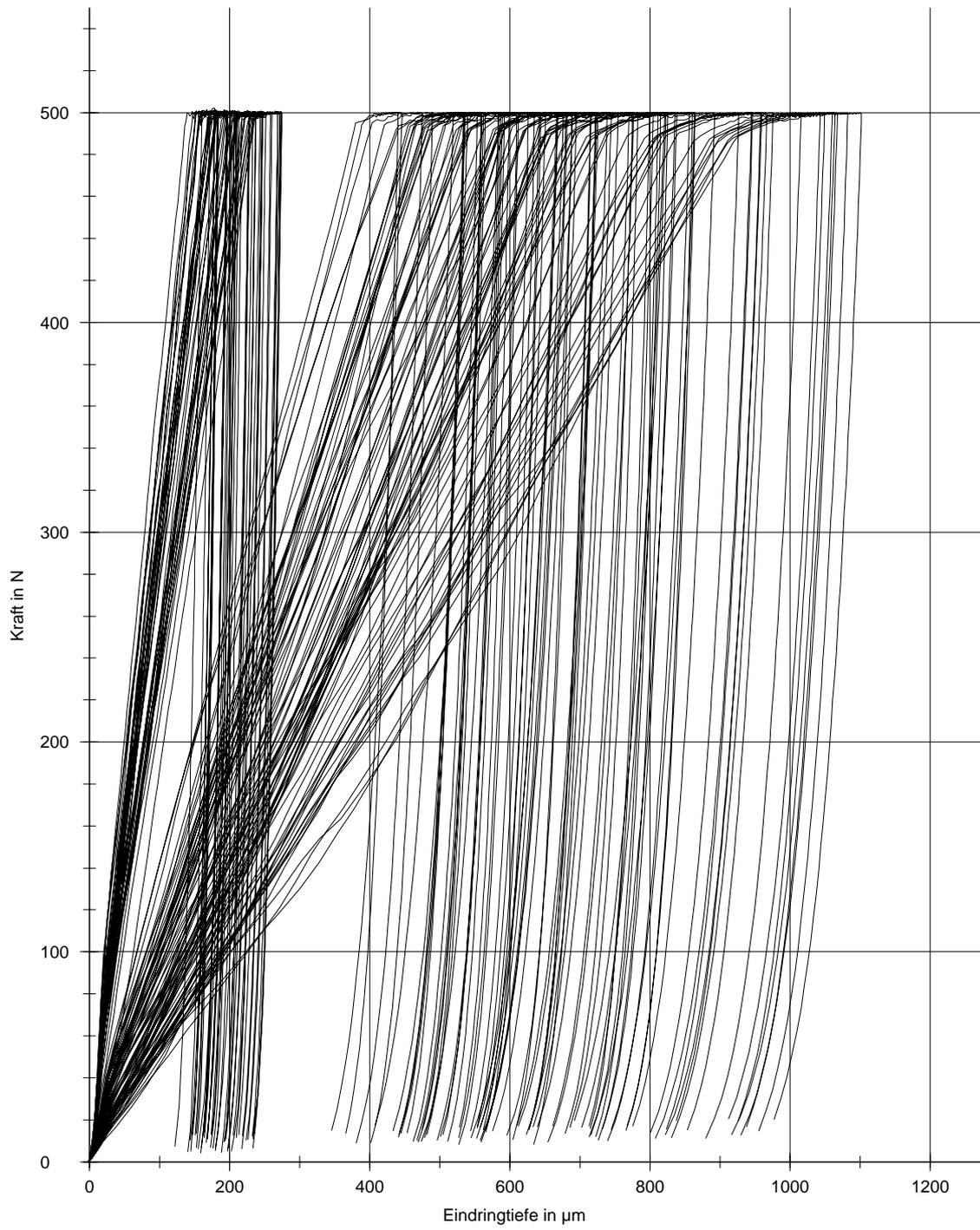


Diagramm A-7: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Buche der Serie 24h/180°C

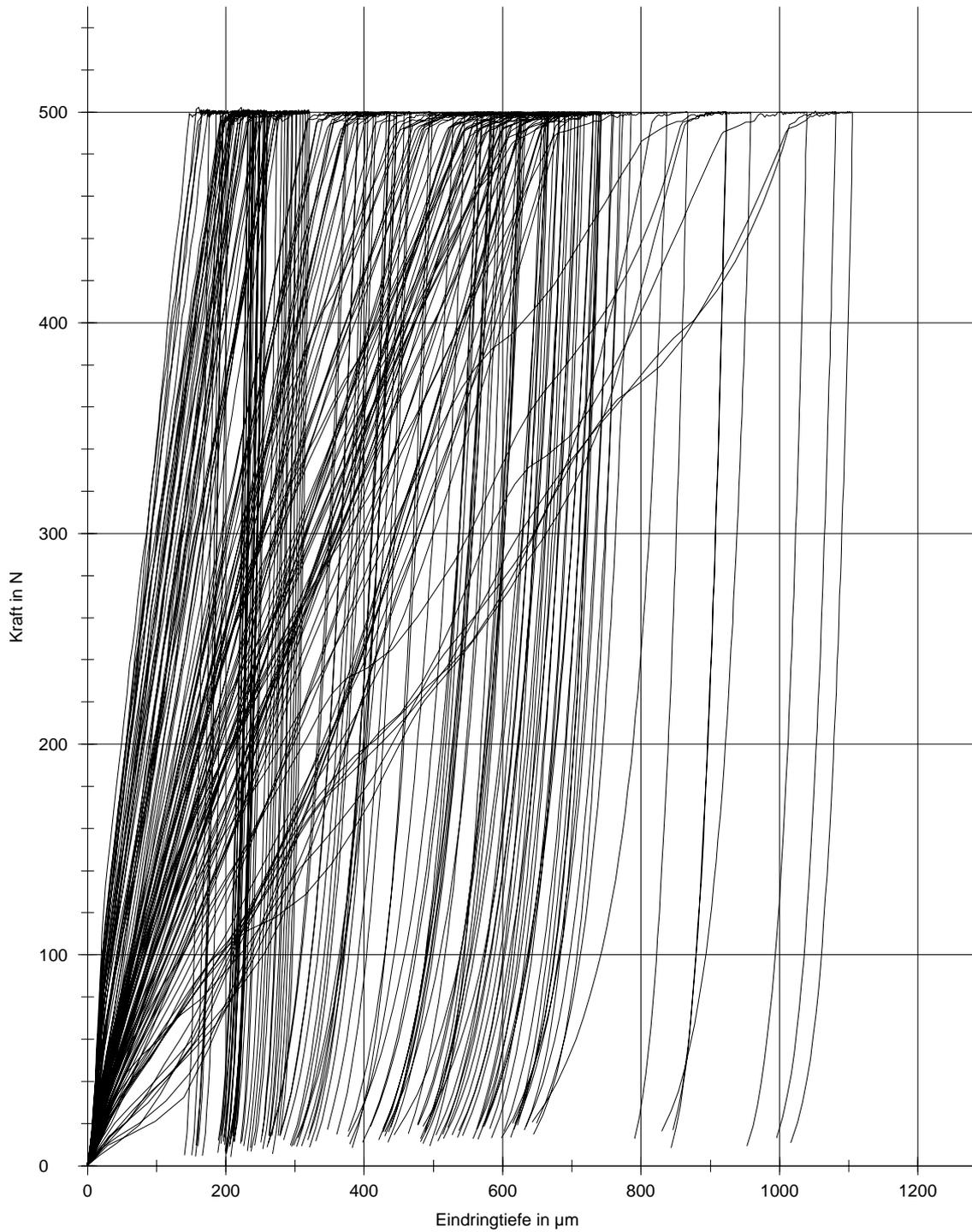


Diagramm A-8: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/160°C

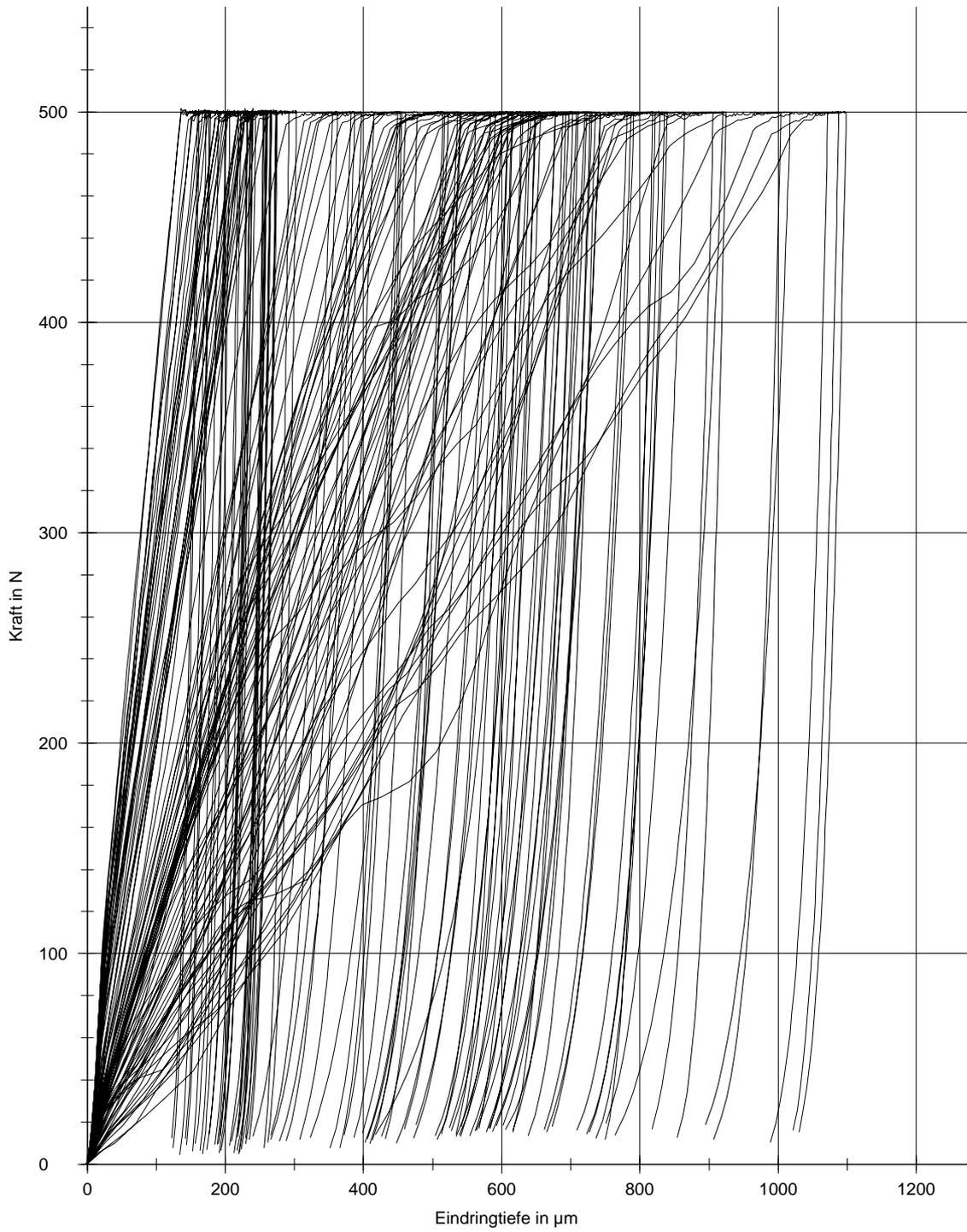


Diagramm A-9: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/180°C

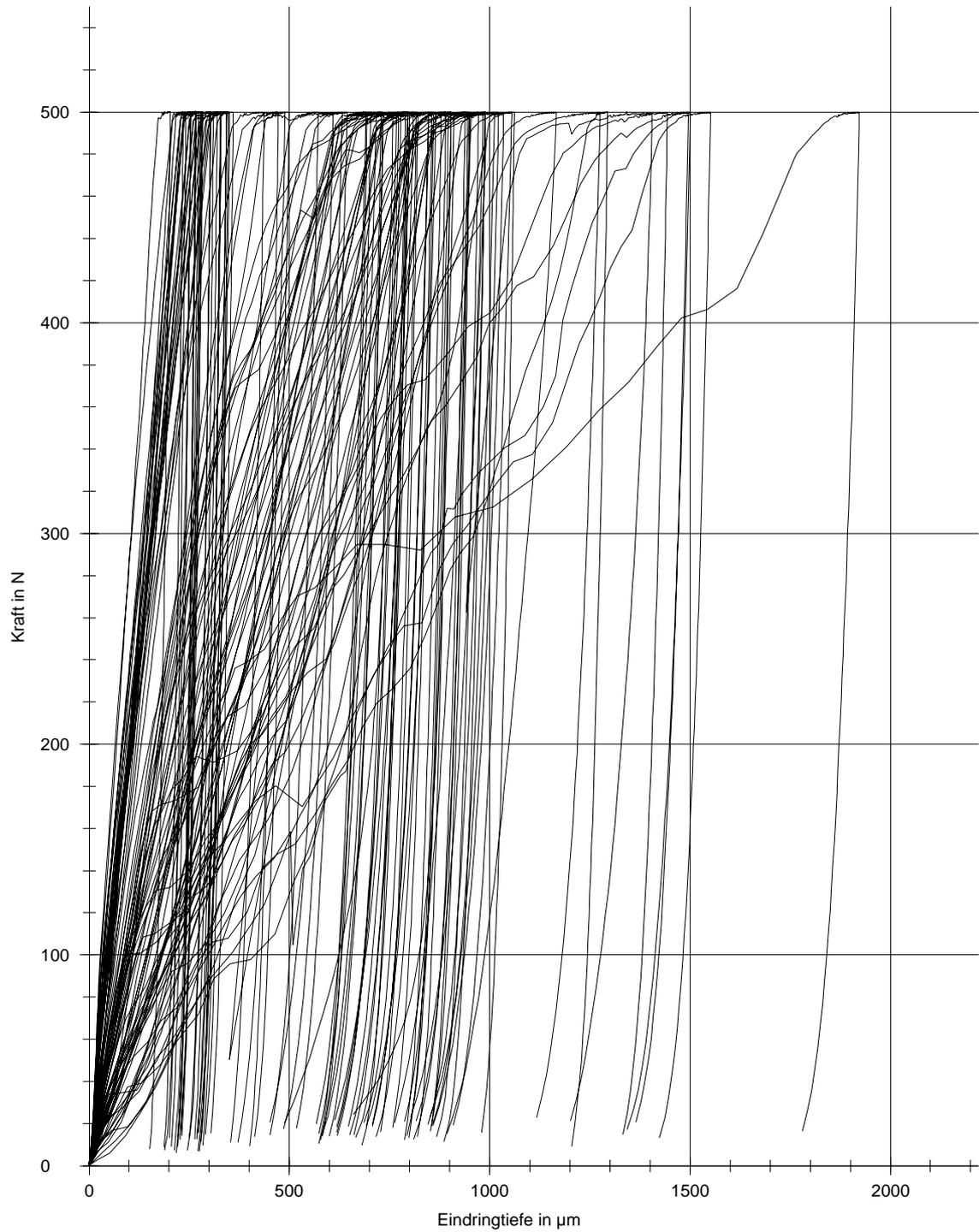


Diagramm A-10: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 24h/200°C

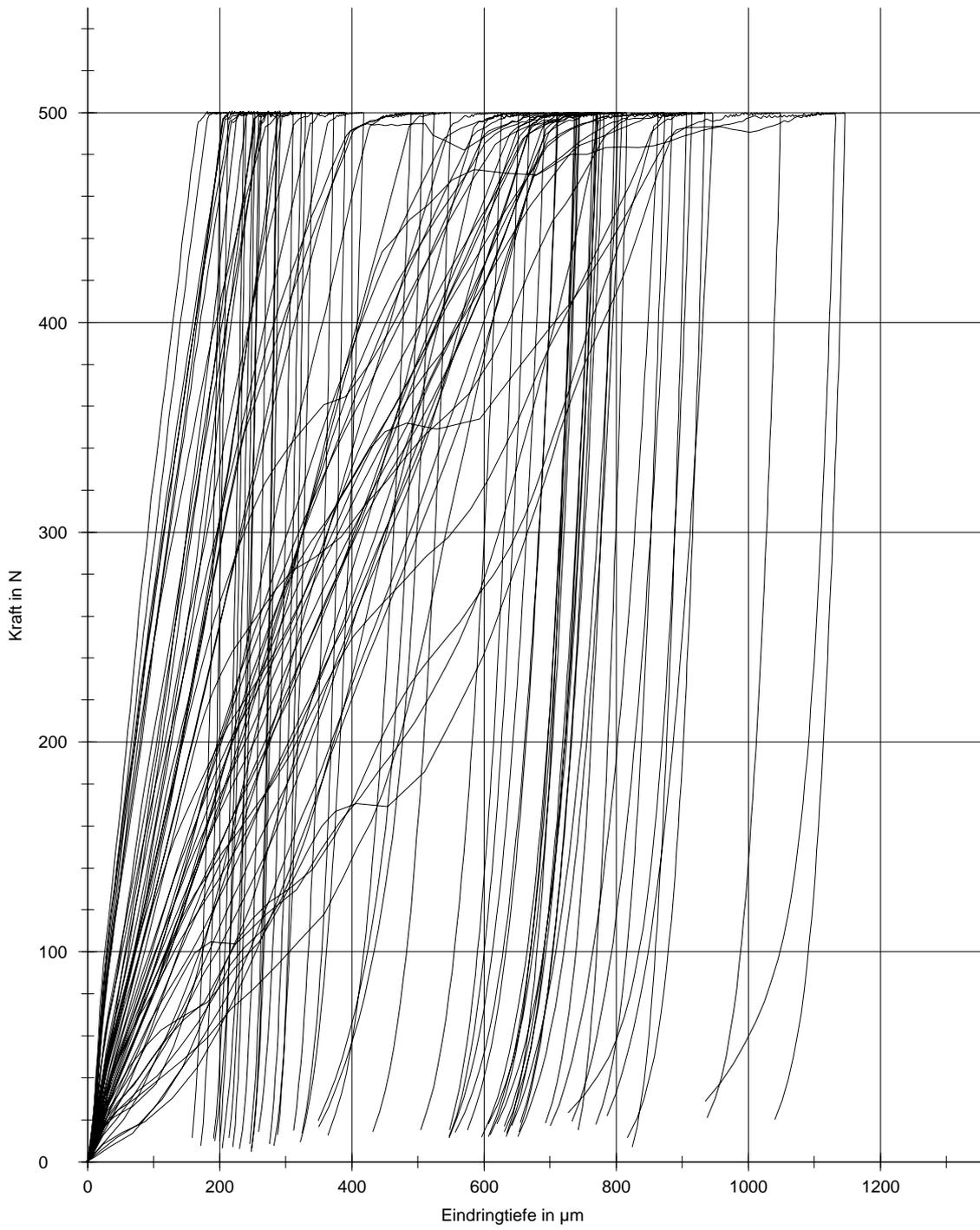


Diagramm A-11: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 12h/200°C

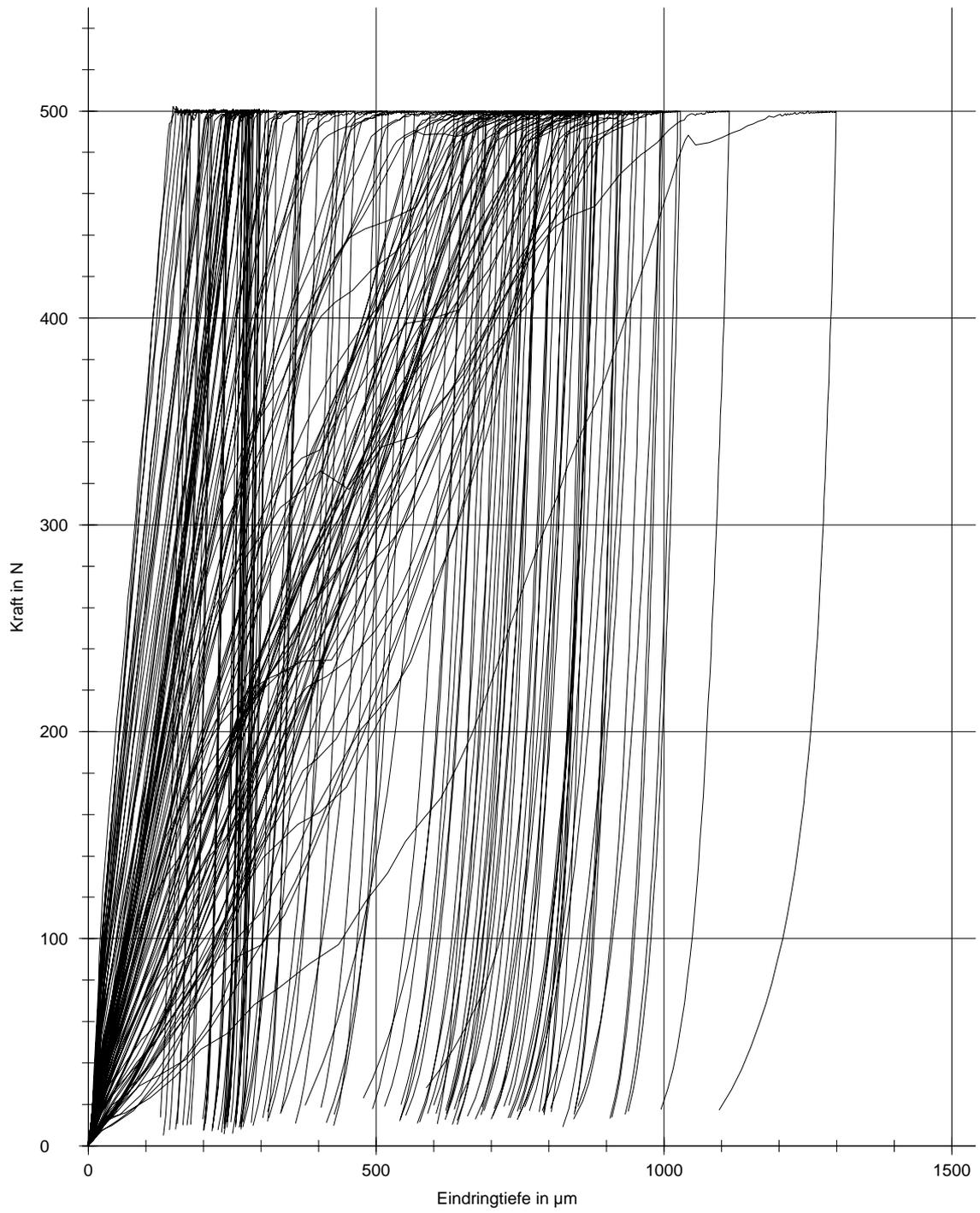


Diagramm A-12: Kraft-Weg-Diagramm der Härtemessung von Esche der Serie 6h/200°C

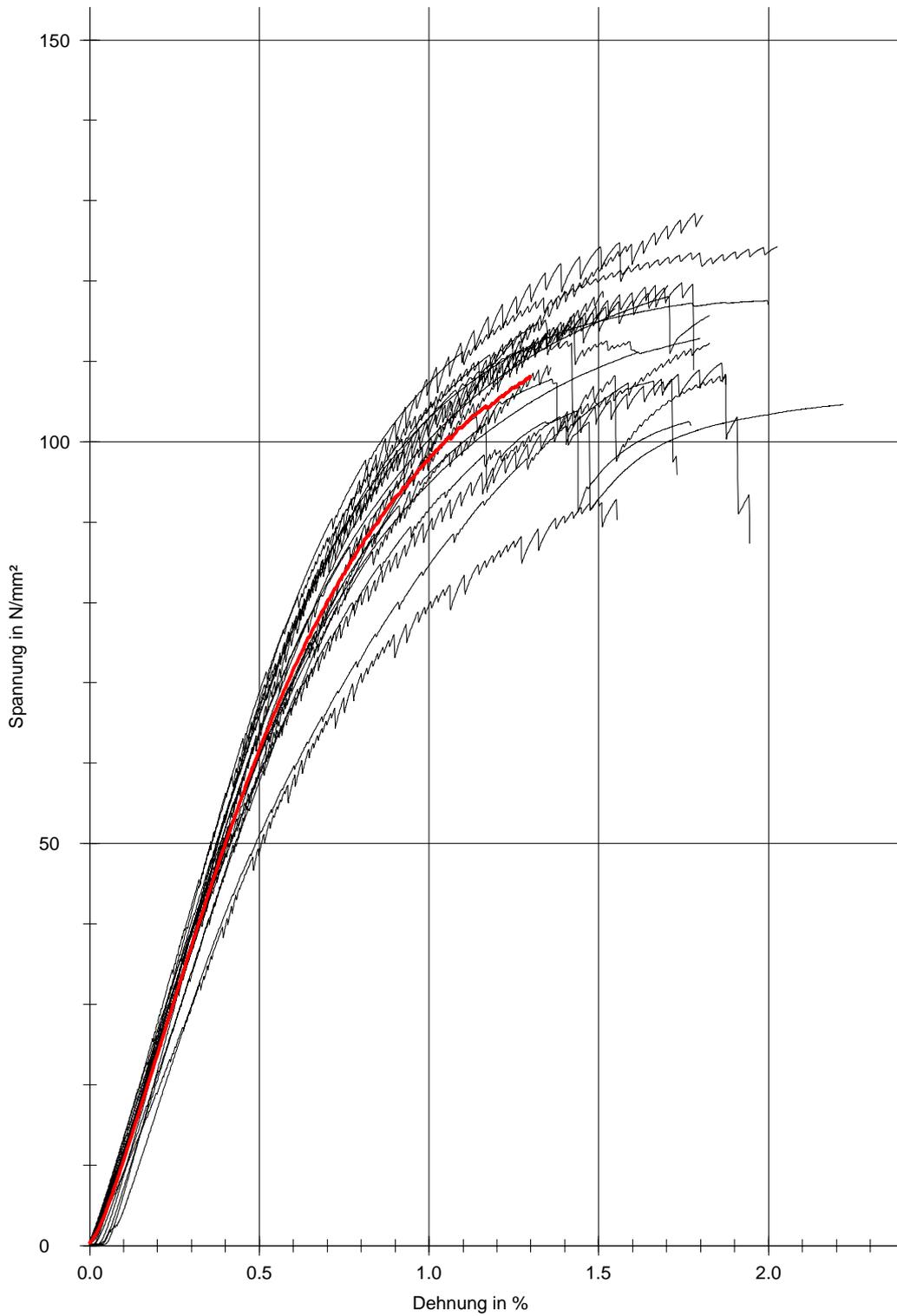


Diagramm A-13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von unbehandelter Buche. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

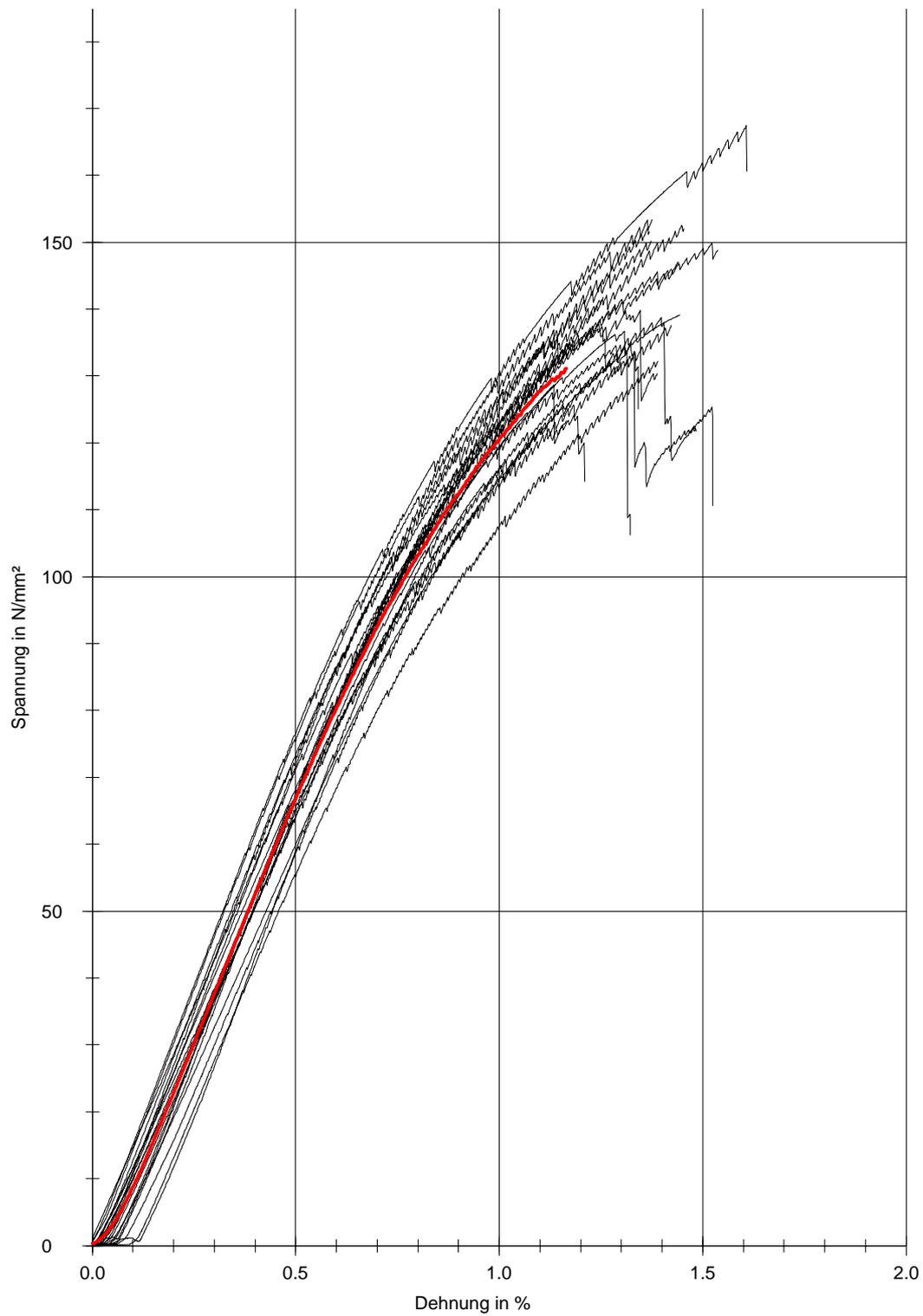


Diagramm A-14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/160°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

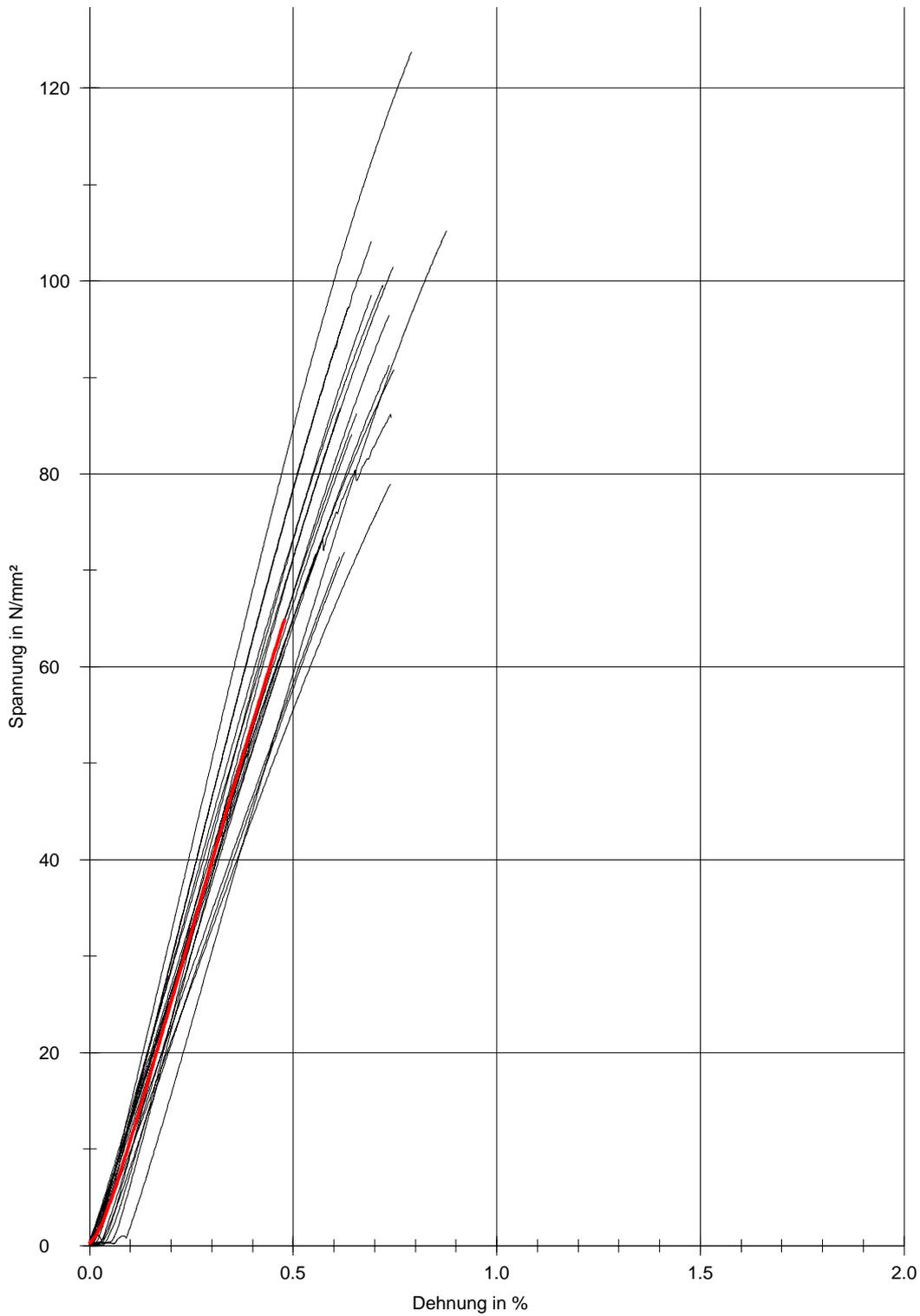


Diagramm A-15: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

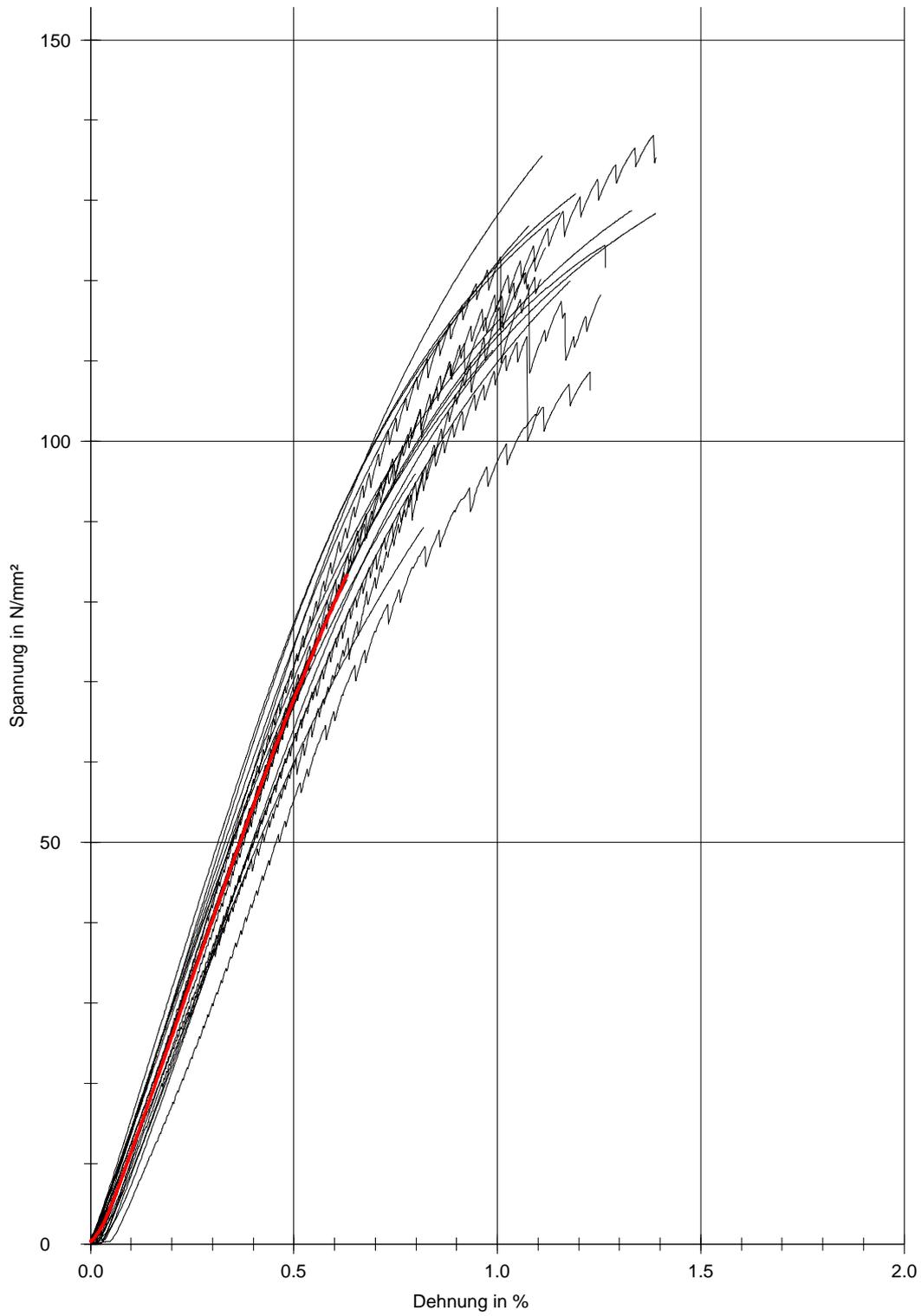


Diagramm A-16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 6h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

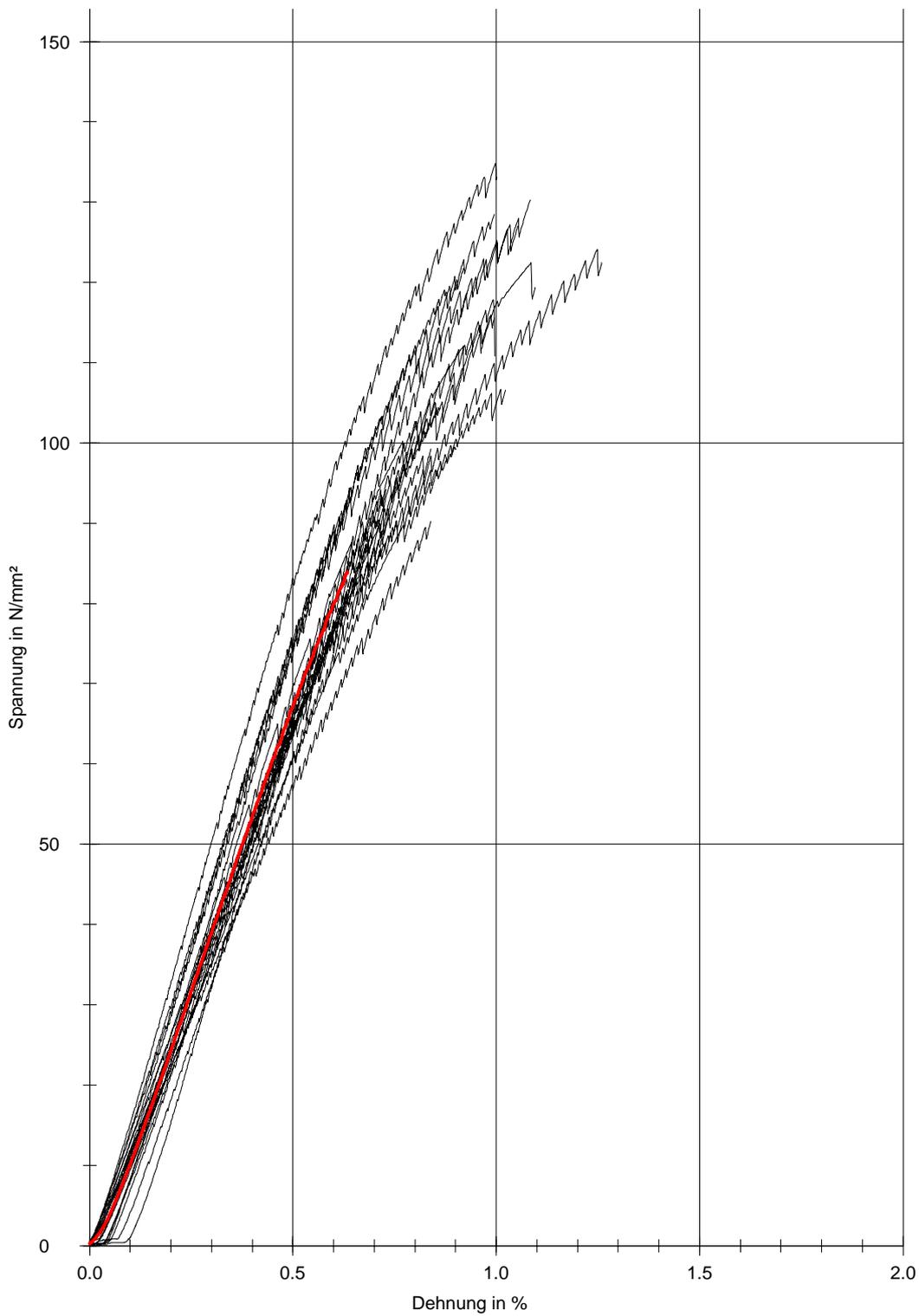


Diagramm A-17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 12h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

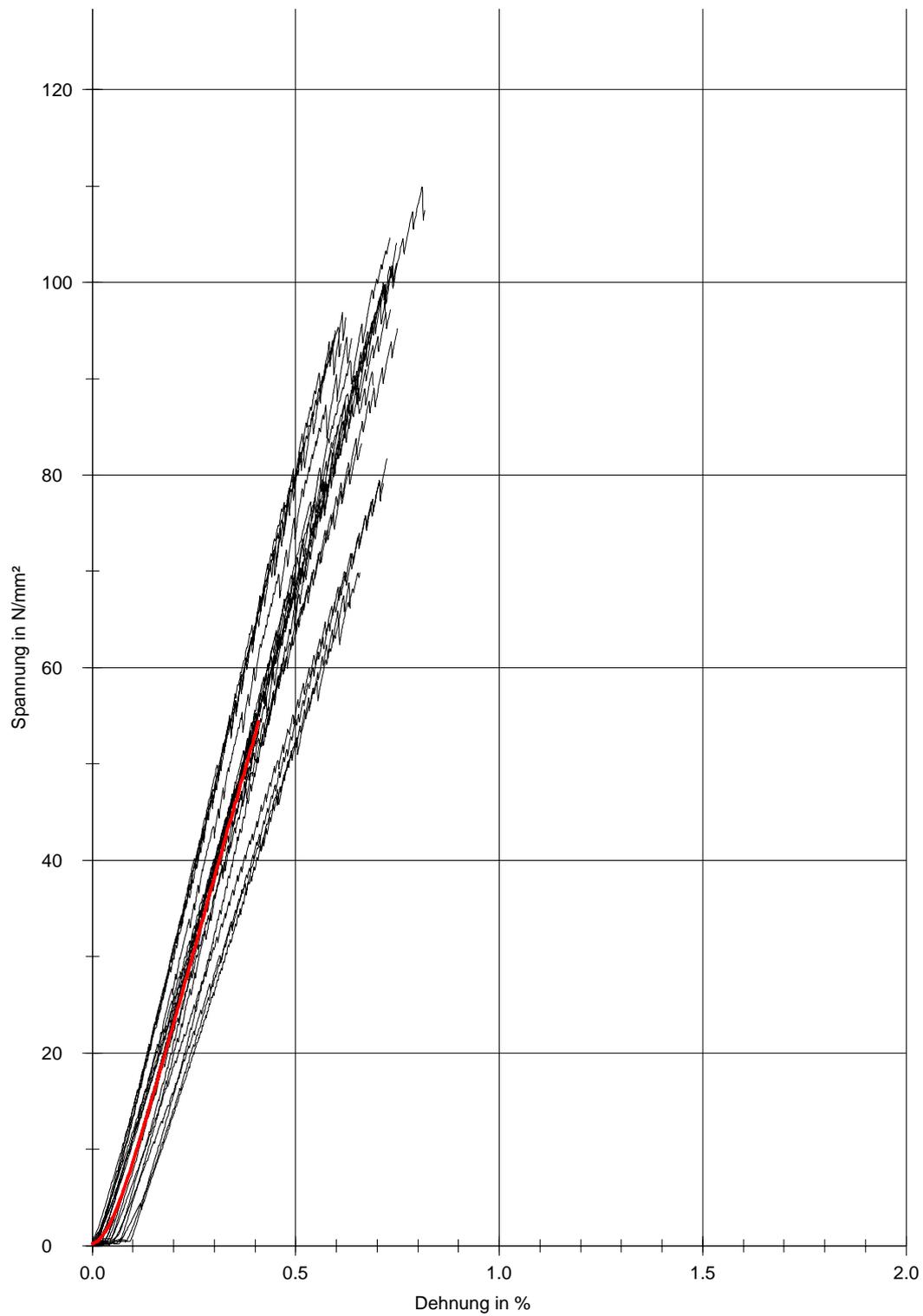


Diagramm A-18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Buche der Serie 24h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

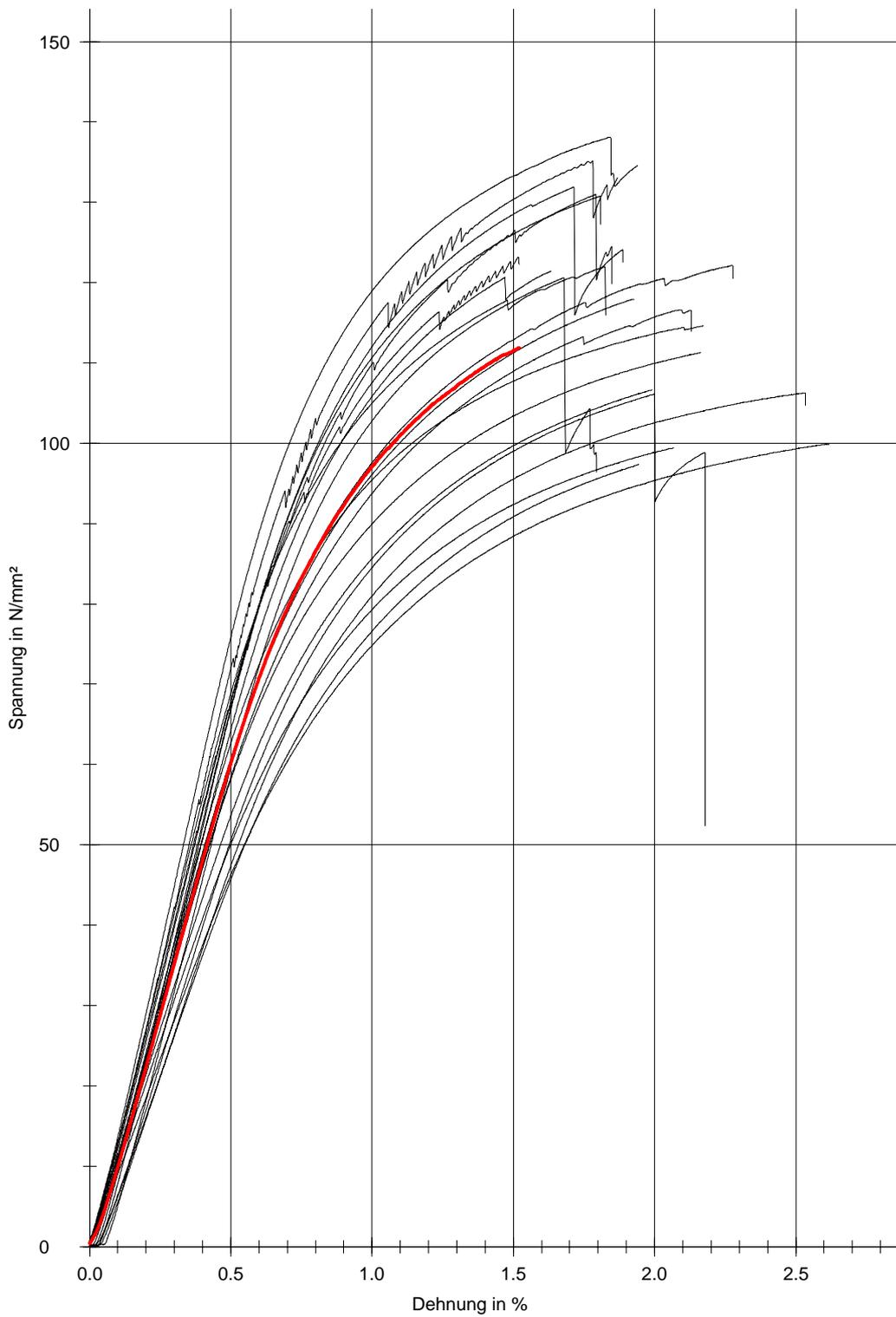


Diagramm A-19: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von unbehandelter Esche. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

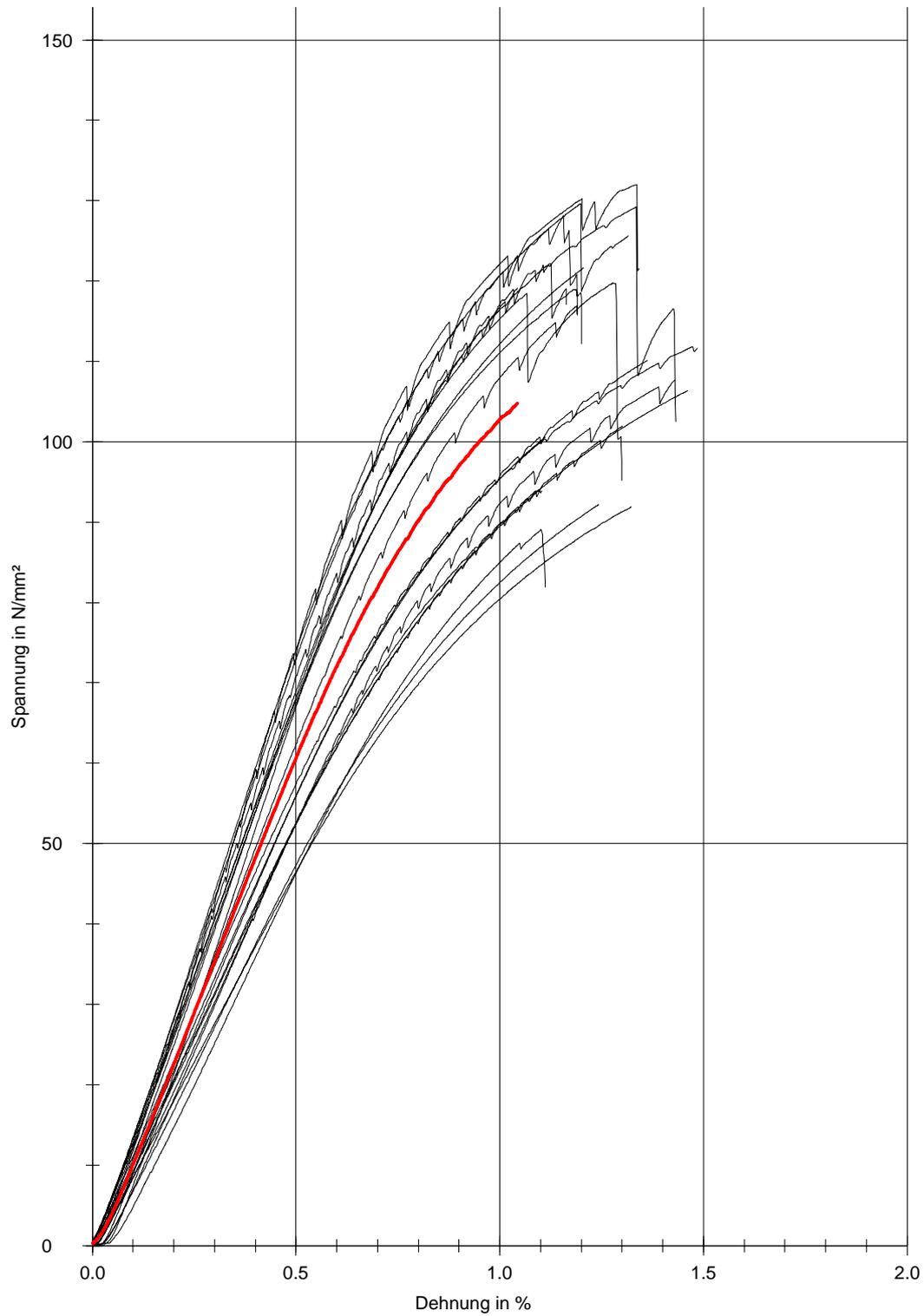


Diagramm A-20: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/160°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

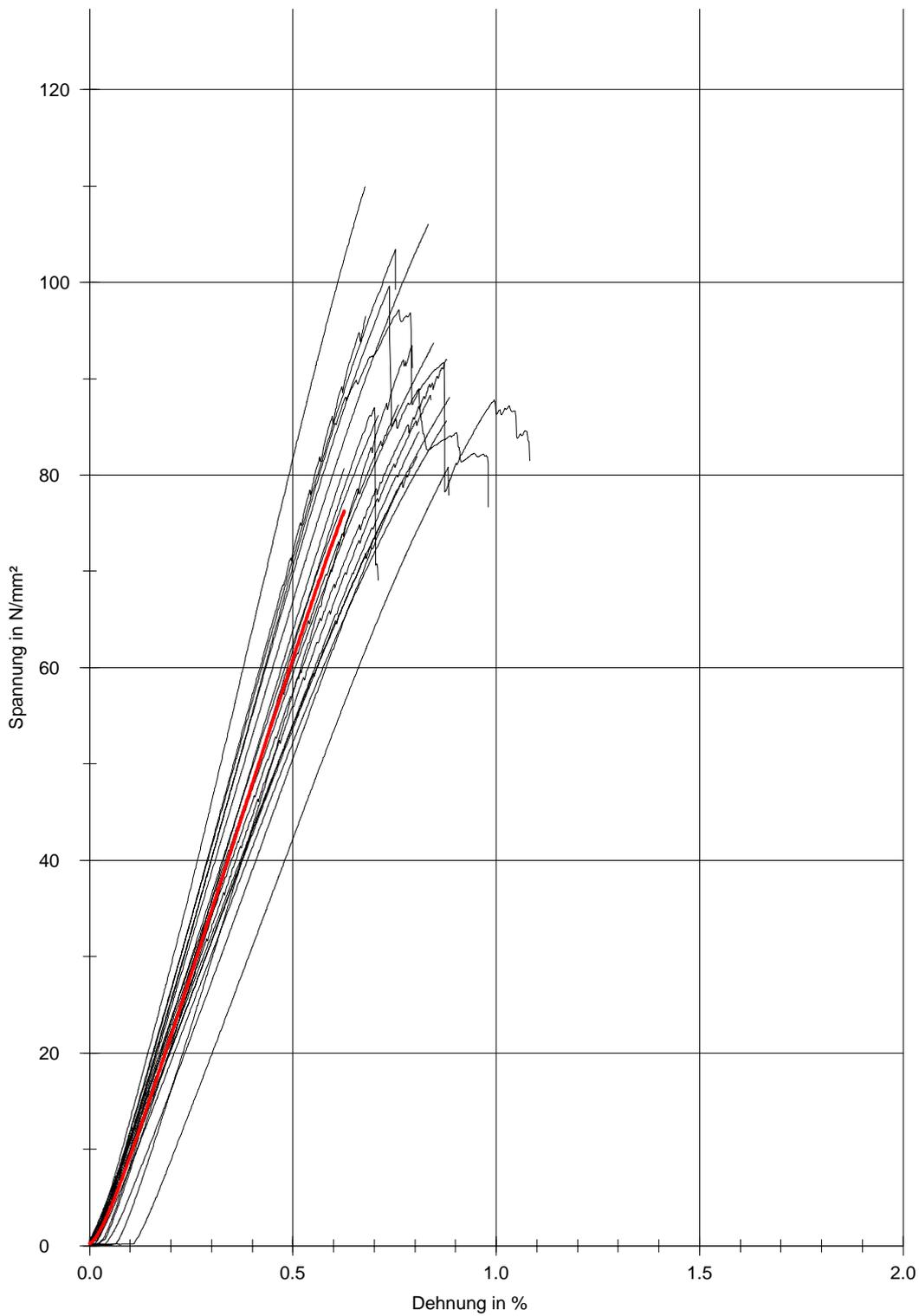


Diagramm A-21: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/180°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

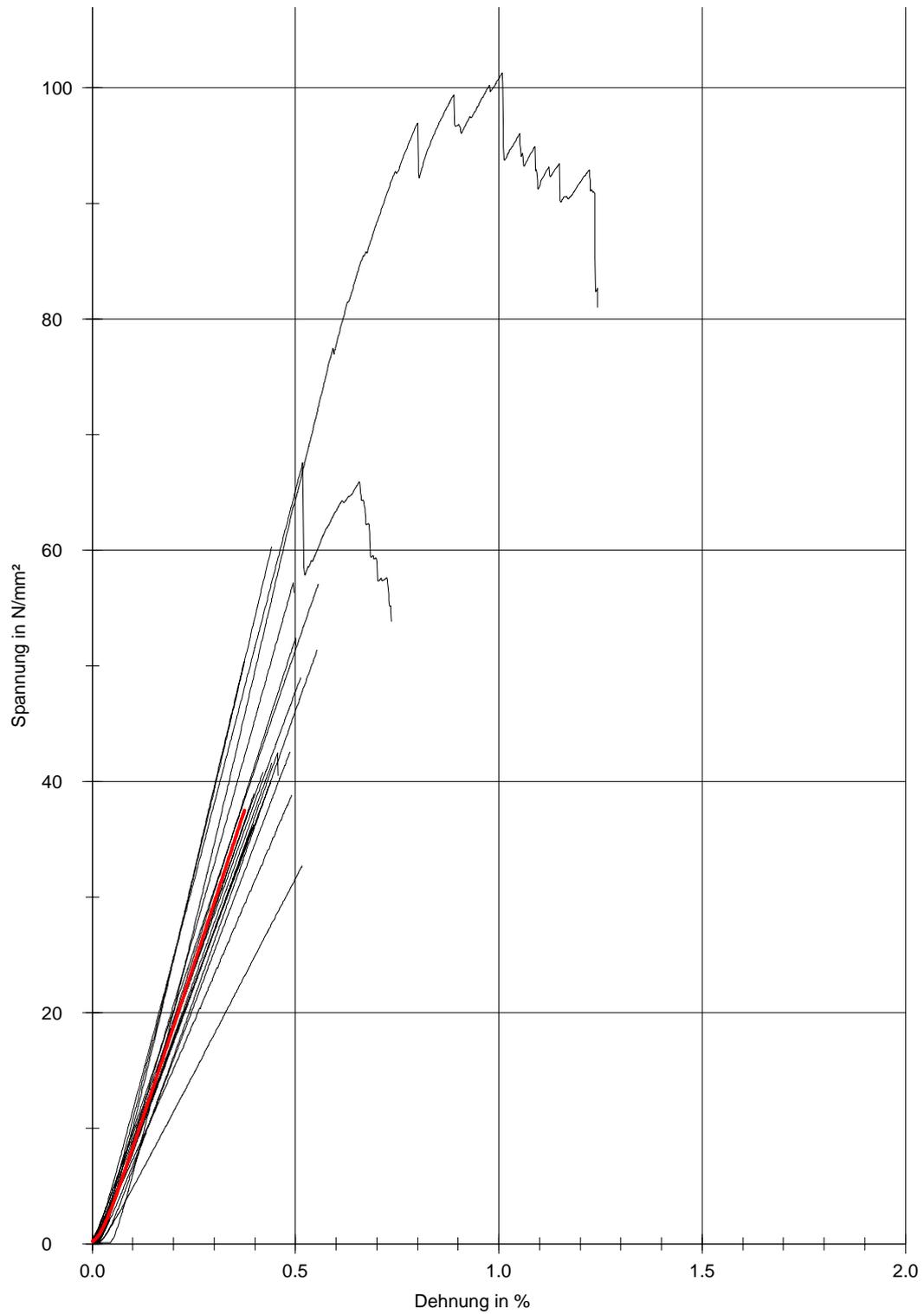


Diagramm A- 22: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 24h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

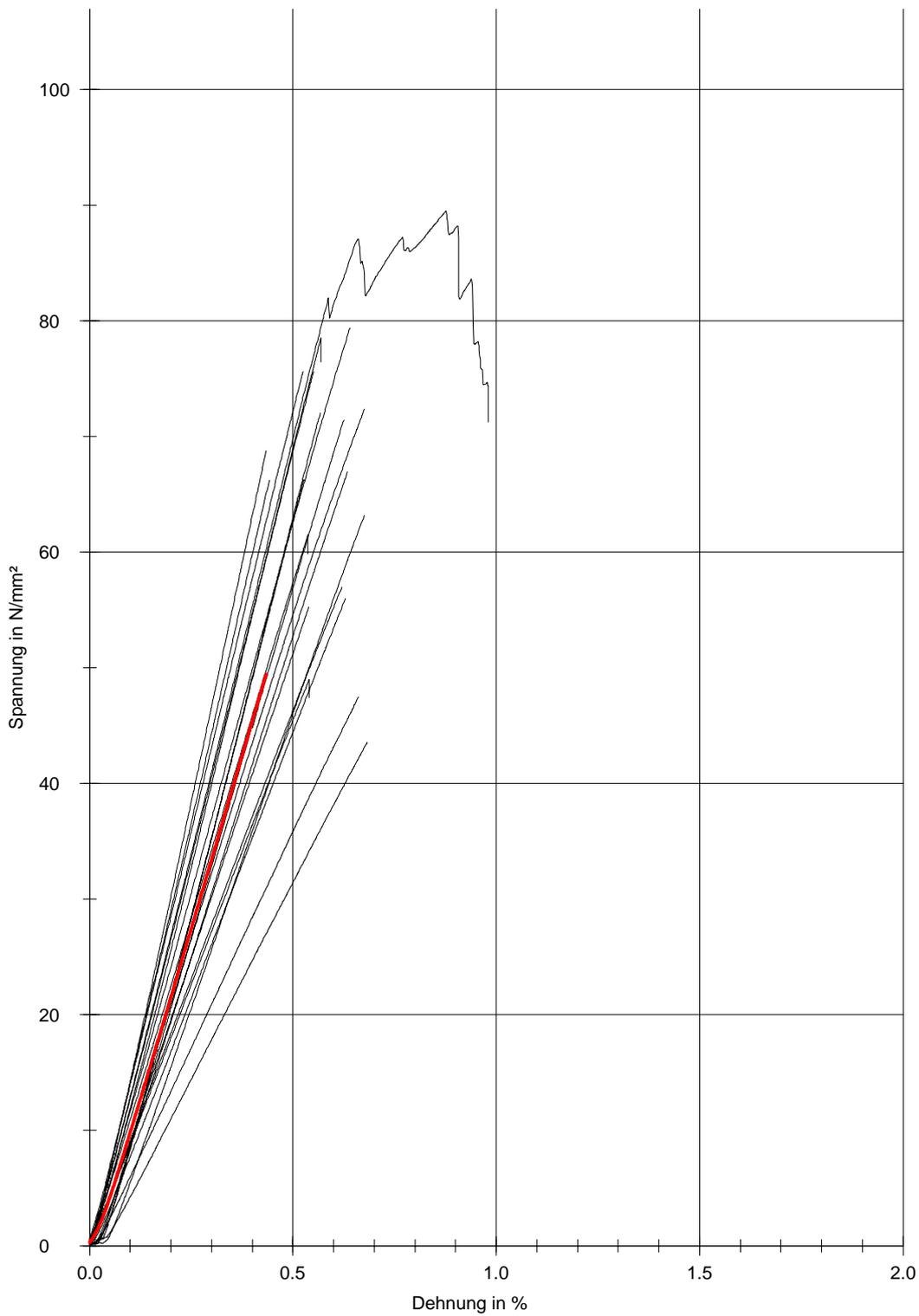


Diagramm A-23: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 12h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

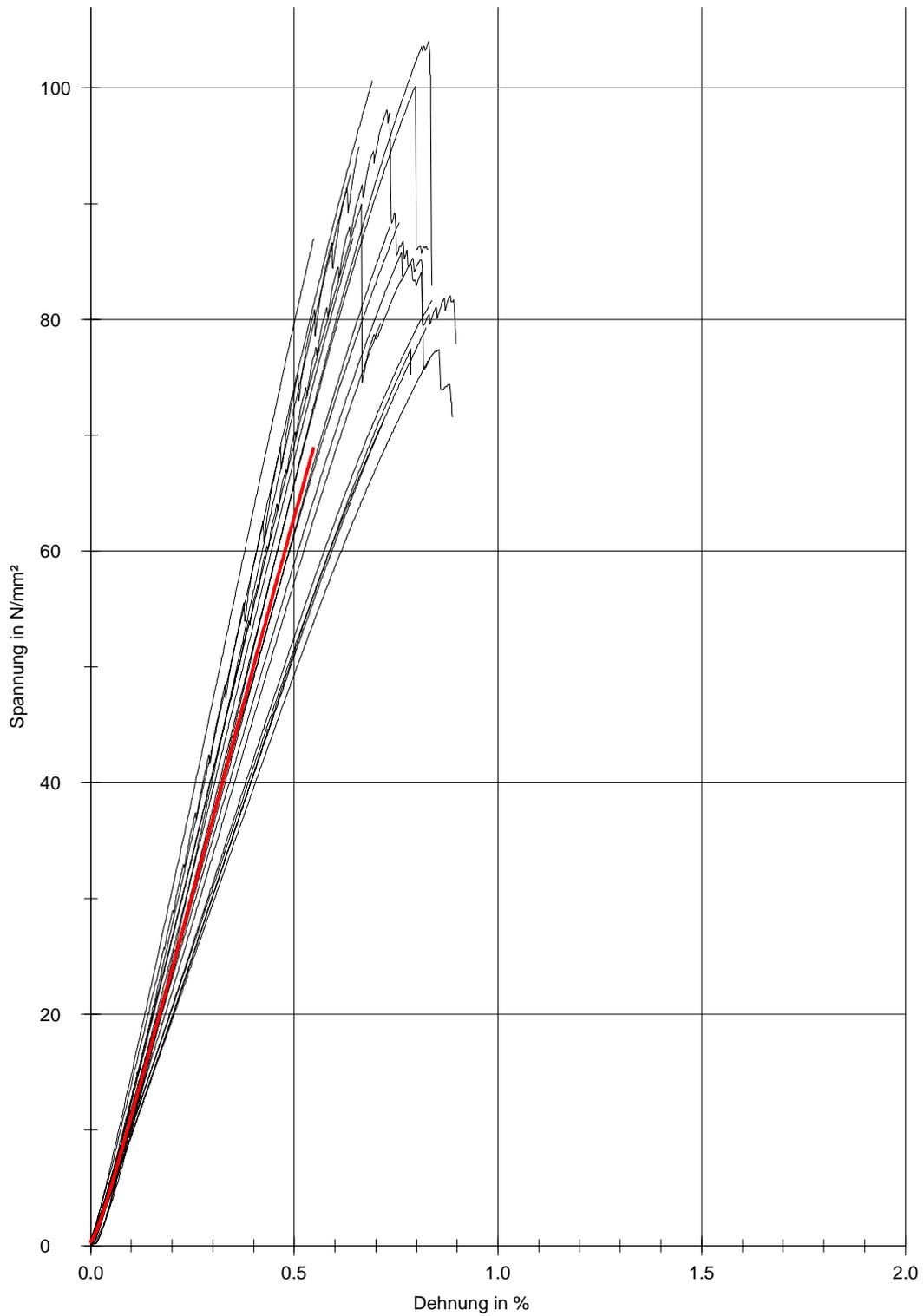
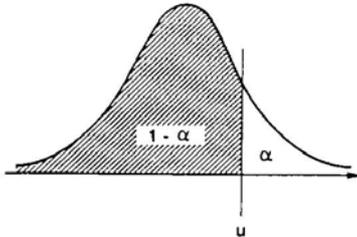


Diagramm A-24: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeversuche von Esche der Serie 6h/200°C. Mittelwertkurve (rot) und Probenkurven (schwarz)

A 6 t-Werte

Tabelle A-34: Schwellenwerte t der t-Verteilung [71]



Beispiel:

$n = 15$ $f = 14$ $1 - \alpha = 95\%$
 $t = 1.761$

$n = 15$ $f = 14$ $\alpha = 2.5\%$
 $t = 2.145$

Freiheits- grad f	1 - α						
	90%	95%	97,5%	99%	99,5%	99,9%	99,95%
1	3,078	6,314	12,710	31,820	63,660	318,300	636,600
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,330	31,600
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,210	12,920
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,869
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610	3,922
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,768
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	3,261	3,496
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,416
100	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174	3,390
200	1,286	1,652	1,972	2,345	2,601	3,131	3,340
500	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,107	3,310
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291

A 7 Merkblätter

A 7.1 Acrylatlack



T E C H N I S C H E S M E R K B L A T T

Bauwerk-Fertigparkettversiegelung: DUROFORTE



1. Eigenschaften

Alle versiegelt gelieferten Bauwerk-Fertigparkettarten (Prepark, Variopark, Multipark, Unopark, Denspark, Megapark, Mosaikparkettdiele usw.) werden bei der Fabrikation mit **lösungsmittelfreien Acrylatlacken** mehrfach **strapazier-fertigversiegelt**. Die Aushärtung erfolgt mit ultravioletem Licht. Die Bauwerk-Werkversiegelung DUROFORTE ist absolut **frei von Formaldehyd** und anderen flüchtigen Schadstoffen. Sie ist somit gesundheitlich absolut unbedenklich, nicht raumluftbelastend und bereits bei der Produktion umweltschonend.

Die Bauwerk-Fertigparkettversiegelung DUROFORTE zeichnet sich durch eine **hohe Abriebfestigkeit** und eine gute Chemikalienbeständigkeit aus. Die Lackschicht ist vollkommen ausgehärtet und besitzt einen mittleren Glanzgrad.

Die hohe Qualität der Bauwerk-Fabrikversiegelung DUROFORTE macht im Normalfall eine zusätzliche Versiegelung (Nachversiegelung) überflüssig.

2. Allgemeines

Die Versiegelung von Parkettböden ist eine imprägnierende und filmbildende Oberflächenbehandlung.

Die Versiegelungsschicht hat die Aufgabe, das hochwertige Parkettholz vor Abnutzung und Verschmutzung zu schützen. Damit die Lackschicht diese Aufgabe möglichst lange erfüllen kann, müssen bestimmte Richtlinien eingehalten werden. Für einen Flächen- und einen zusätzlichen Fugenschutz nach der Fertigparkettverlegung empfehlen wir als Erstpflege den Einsatz unseres Pflegemittels Bauwerk Wachspolish. Für die weitere Unterhaltspflege kann weiterhin das lösungsmittelhaltige Bauwerk Wachspolish oder das wasserhaltige Bauwerk Parkettpolish eingesetzt werden. Genaue Angaben finden Sie im Technischen Merkblatt «Reinigung und Pflege von versiegelten Parkettböden».

3. Nachversiegelung

In absoluten Ausnahmefällen kann es notwendig bzw. zweckmässig sein (z.B. noch höherer Verschleisswiderstand, Gleiteigenschafts- oder Glanzgradveränderung), die verlegte Fertigparkettfläche bereits im Neuzustand nochmals zu versiegeln.

A 7.2 Wasserlack Grundierung



SEAL - Grundlack - couche de fond - prodotti di fondo

- Wasserhaltige Grundierung für alle wasserbasierten Bona-Decklacke.
- Hochwertige Copolymer-Dispersion zur Reduzierung der Fugenverklebung.
- Praktisch geruchlos, lösungsmittel- und formaldehydfrei.

Produktbeschreibung

Seal ist ein wasserbasierter, einkomponentiger Versiegelungsgrundlack auf Akrylat-Polyurethanbasis für alle üblichen Parkethölzer und Kork.

Anwendungsbereich

Seal sollte grundsätzlich als erster Anstrich unter allen wasserbasierten Bona-Decklacken mit folgenden Vorteilen eingesetzt werden:

- Reduzierung der Fugenverklebungstendenz und damit geringere Gefahr der Entstehung von Abrissfugen.

Holzschliff

Vor Anwendung eines wasserbasierten Versiegelungslackes sollte der letzte Feinschliff mindestens mit Körnung 120 oder 150 ausgeführt werden. Je feiner der Schliff, desto geringer die Holzaufrauhung und die Schleifarbeit beim Lackschliff.

Verarbeitung

Die mit Seal zu behandelnden Parkettflächen müssen sorgfältig geschliffen und frei von Schleifstaub, Öl, Wachs und anderen Verunreinigungen sein. Die Raumtemperatur muss über 15°C liegen. Seal wird einmal satt mit der Wasserlackrolle aufgetragen (Verbrauch ca. 100 - 125 g/m²). Die Trockenzeit beträgt bei normalen Klimabedingungen 1 bis 2 Stunden. Seal muss vor dem Decklackauftrag vollständig ausgehärtet sein.

Weitere Angaben

Seal ist giftklassenfrei und nicht brennbar. Seal besitzt eine Lagerfähigkeit im ungeöffneten Gebinde von einem Jahr und ist vor Frost zu schützen. Bei Verwendung der gleichen Rolle für Grundierung und Decklack ist eine Zwischenreinigung mit Wasser durchzuführen.

Vorbehalt

Obigen Angaben liegen umfassende Versuche im Labor und in der Praxis zugrunde. Da die Verhältnisse, unter denen unsere Produkte verwendet werden nicht unserer Kontrolle unterliegen, können wir nur für die Qualität des Lackes garantieren.

BAGT-Nr. 102696

Giftklassenfrei / non classé toxique / non tossico

- Couche de fond aqueuse pour tous les vernis Bona.
- Dispersion copolymère de qualité réduisant l'encollage des lames au niveau des joints.
- Pratiquement inodore et ne contenant ni solvant, ni formaldéhyde.

Description du produit

Seal est une couche de fond aqueuse mono-composante à base acrylique et polyuréthane pour tous les bois de parquet courants et le liège.

Application

La couche de fond Seal doit en principe être appliquée comme première couche sous tous les vernis aqueux Bona avec les avantages suivants:

- Réduction de la tendance des lames à se coller au niveau des joints, donc danger réduit de voir apparaître des joints larges irréguliers.

Ponçage

Avant l'utilisation d'un vernis à base d'eau, effectuer le dernier ponçage fin avec un grain d'au moins 120 ou 150. Plus le ponçage sera fin, moins le bois sera rugueux et plus le dépolissage entre les couches de vernis sera facilité.

Utilisation

Les surfaces à traiter avec le Seal doivent être poncées consciencieusement et être exemptes de poussière de ponçage, d'huile, de cire ou autres saletés. La température de la pièce doit dépasser 15°C. Etaler généreusement une couche de Seal au rouleau pour vernis aqueux (consommation env. 100 - 125g/ m²). Le temps de séchage est de 1 à 2 heures lors de conditions climatiques normales. La couche de Seal doit être complètement durcie avant d'appliquer le vernis de finition.

Données complémentaires

Le Seal est classé non toxique et inflammable. En bidon fermé non entamé, le Seal peut se conserver 1 an et doit être stocké à l'abri du gel. Si le même rouleau est utilisé pour l'application de la couche de fond et du vernis, il faudra effectuer un nettoyage intermédiaire à l'eau.

Restrictions

Les données décrites ci-dessus sont basées sur de nombreux essais en laboratoire et expériences pratiques. Comme nous ne pouvons contrôler les conditions dans lesquelles nos produits sont utilisés, nous ne pouvons garantir que la qualité de notre vernis.

- Fondo contenente acqua per tutte le lacche di copertura Bona a base di acqua.
- Eccellente dispersione Copolymer per ridurre l'incollatura fra le fughe.
- Inodore, senza solventi e senza formaldeide.

Descrizione del prodotto

Seal è una lacca di fondo ad una componente e a base di acqua. Il prodotto è pure a base acrilica e di poliuretano, è adatto per tutti i legni per parquet e per sughero.

Settore di applicazione

Seal dovrebbe essere, di regola, utilizzato come prima mano sotto tutte le lacche di copertura Bona a base di acqua. Esso presenta i seguenti vantaggi:

- Riduzione della tendenza all'incollatura delle fughe con conseguente riduzione del pericolo di formazione di screpolature.

Lamatura del legno

Prima di applicare una lacca a base di acqua si dovrebbe eseguire l'ultima carteggiatura con carta no. 120 o 150. La lamatura più fine permette di ottenere un legno molto meno ruvido e semplifica la successiva lamatura della lacca.

Lavorazione

Le superfici di parquet da trattare con il prodotto Seal devono essere accuratamente laminate e libere da polvere, cera, olio e da ogni altra impurità. La temperatura del locale deve essere superiore a 15°C. stendere abbondantemente uno strato di seal con l'apposito rullo (consumo circa 100-125 g/m²). Con normali condizioni climatiche il tempo di essiccazione è di 1-2 ore. Prima di applicare la lacca di copertura, il prodotto Seal deve essere completamente indurito.

Ulteriori indicazioni

Il prodotto Seal non è infiammabile e non è tossico. Non aperto, può essere conservato per un anno al riparo dal gelo. Se si utilizza lo stesso rullo per il fondo e per la lacca di copertura, si raccomanda di effettuare una pulizia intermedia con acqua del rullo.

Riserve

I dati sopracitati si basano su rigorose prove di laboratorio ed esperienza pratica. Siccome le condizioni in cui i nostri prodotti vengono utilizzati non possono essere da noi verificate, siamo in grado di garantire solamente la qualità della lacca.

www.bauwerk-parkett.com

Bauwerk Parkett AG CH-9430 St.Margrethen Tel. 071 747 74 74 Fax 071 747 74 75

Bauwerk Parkett GmbH Eberhardstr. 50 D-72411 Bodelshausen Tel. 07471 700-0 Fax 07471 700-136

Bauwerk-Kährs Parkett GmbH Gngler Strasse 61 A-5020 Salzburg Tel. 0662 873 871 0 Fax 0662 872 982 34

Huot Bauwerk Parquets 20 Avenue de la Gare F-10800 Saint Julien les Villas Tel. 03 25 82 54 05 Fax 03 25 75 39 88

Bauwerk Parkett (UK) Unit 2 West 68 Bognor Road Chichester, West Sussex PO19 2NS/UK Phone 01243 792 199 Fax 01243 773 243

A 7.3 Wasserlack Deckauftrag

bauwerk

DIE SCHWEIZER PARKETTMACHER

FLOW

Produktbeschreibung

- Wasserhaltiger Parkettlack für mittlere bis hohe Beanspruchung
- Zweikomponentiger Polyurethanlack mit Glanzgrad halbmatt
- Hohe Füllkraft und Abriebfestigkeit, gute Chemikalienbeständigkeit

Anwendung

Flow ist ein wasserhaltiger zweikomponentiger Versiegelungslack auf Polyurethan-Dispersionsbasis für die Oberflächenbehandlung von Parkett, andere Holzböden und Kork. Flow bewährt sich im Wohnbereich und im öffentlichen Bereich mit normaler Publikumsbeanspruchung. Bei einer Neuversiegelung wird generell der vorgängige Einsatz der wasserbasierten Grundierung Prime oder Seal zur Reduktion der Fugenverklebung empfohlen. Grundsätzlich ist Flow kein Nachversiegelungslack für Fertigparkett.

Folgende Vorbereitungsarbeiten sind auszuführen:

- Sorgfältige Ausführung eines möglichst feinen Holzschliff (letzte Körnung 120/150).
- Den letzten Schliff mit einer Scheibenmaschine durchführen. Je feiner der letzte Holzschliff desto geringer die Schleifarbeit beim Lack-schliff.
- Der Lackkomponente 10 % Härter Flow zugeben und intensiv mischen. Immer nur so viel Lack anmischen wie für einen Anstrich benötigt wird. Kleinmengen in leerem Lackbehälter mit entsprechender Härtermenge mischen. Bei der Verarbeitung ganzer Gebinde kann die gesamte Härtermenge in das Lackgebinde gegeben werden. Nach sofortiger intensiver Mischung im Gebinde (mind. 1 Min. schütteln) ist der Lack gebrauchsfertig und kann mit der Wasserlackrolle aufgetragen werden.

Folgende Versiegelungsaufbauten werden empfohlen:

- 1 Anstrich Grundlack Prime oder Seal mit der Wasserlackrolle. 2 (3) Anstriche Flow mit der Wasserlackrolle.
- Die höhere Anzahl Anstriche Flow gilt bei stärkerer Beanspruchung oder gewünschter längerer Lebensdauer der Versiegelung.
- 1 Anstrich D-5 Imprägniersiegel. (Wirkung: Intensivierter Holzfarbton, keine Reduktion der Fugenverklebung). 2 (3) Anstriche Flow mit Wasserlackrolle.

Zwischenschliff:

Grundsätzlich vor letztem Anstrich feinen vollflächigen Lack-schliff ausführen (z.B. Netz 150).

Trockenzeit:

Bei Rollenauftrag 2-3 Stunden (20°C / 50% Luftfeuchtigkeit).

Begehbarezeit:

Kann nach 8 - 12 Stunden vorsichtig betreten werden.

Belastbarkeit:

Nach 8 - 10 Tagen normal beanspruchbar, Pflegemittelauftrag und Belegung mit Teppichen möglich.

Verarbeitungstemperatur:

Boden-, Lack- und Raumtemperatur mind. 15°C. Auftragsmenge (Verbrauch): Bei Rollenauftrag 100-125 g/m², d.h. 1 ltr. = 8-10 m²

Wichtige Hinweise:

Die Lackkomponente von Flow ist giftstofffrei (Härter = Giftklasse 4), nicht brennbar und frostempfindlich. Die Arbeitsgeräte können mit Wasser vorgereinigt werden, eine Nachreinigung mit Lösungsmittel wird empfohlen. Lackreste nicht in die Kanalisation schütten, sondern eintrocknen lassen und der Abfallentsorgung zuführen.

FLOW

Description du produit

- Vernis aqueux pour parquets à moyenne jusqu'à forte sollicitation
- Vernis polyuréthane à 2 composants – aspect satiné
- Haut pouvoir de remplissage et résistance à l'abrasion – bonne stabilité chimique.

Application

Flow est un vernis deux composants aqueux à base de dispersion polyuréthane pour le traitement des surfaces de parquet ou autres sols en bois ou liège. Flow a fait ses preuves dans le domaine de l'habitation et dans le domaine public à sollicitation normale. En cas de nouvelle vitrification, il est recommandé d'utiliser au préalable Prime ou Seal, afin de réduire le collage des lames au niveau des joints. A la base, Flow n'est pas un vernis pour survitrification de parquet fini.

Les travaux préparatoires suivants sont à exécuter:

- Poncer finement la surface du parquet (dernier grain 120/150)
- Effectuer le dernier ponçage au moyen d'une monobrosse. Plus le ponçage sera fin, moins le bois sera rugueux et plus le dépolissage du vernis sera facilité.
- Ajouter 10 % de durcisseur Flow au vernis Flow et mélanger énergiquement.
- Ne préparer que la quantité nécessaire pour 1 couche. Les petites quantités devront être mélangées avec le durcisseur correspondant dans un récipient à peinture vide.
- En cas de préparation d'un bidon complet, le durcisseur pourra être ajouté directement au vernis. Après un mélange immédiat et intensif dans le bidon (secouer pendant minimum 1 min.), le vernis est prêt à l'emploi et peut-être appliqué avec un rouleau pour vernis aqueux.

Nous recommandons les modes d'application suivants du vernis:

- 1 couche de base Prime ou Seal appliquée au rouleau pour vernis aqueux.
- 2 (3) couches Flow appliquées au rouleau pour vernis aqueux
- Un nombre plus élevé de couches Flow se justifie lors de fortes sollicitations ou si une durée de vie plus longue de la vitrification est désirée.
- 1 couche de vernis d'imprégnation D-5 (effet d'intensification de la couleur du bois, pas de réduction du collage des joints)
- 2 (3) couches Flow appliquées au rouleau pour vernis aqueux

Ponçage intermédiaire:

Il est impératif d'effectuer un ponçage fin de toute la surface (par ex. treillis 150) avant la dernière couche

Temps de séchage:

en cas d'application au rouleau: 2-3 heures (température de 20°C et humidité ambiante de l'air de 50 %)

Utilisation:

On peut marcher avec précaution sur le sol verni après 8-12 heures. Après 8-10 jours, le sol est utilisable normalement, la pose de tapis et l'utilisation de produits de nettoyage sont possibles

Température pour l'application:

15°C minimum pour le sol, le vernis et la température ambiante

Quantité d'utilisation:

avec rouleau : 100-125 g/m², c.-à-d. 1 L. = 8-10 m²

Indications importantes:

Les composants du vernis Flow sont classés non toxiques (seul le durcisseur est en classe 4) et sont ininflammables et sensibles au gel. Les outils peuvent être nettoyés préalablement à l'eau, mais un nettoyage ultérieur avec dissolvant est recommandé. Ne pas jeter les restes de vernis dans les canalisations, mais les laisser sécher et les mettre ensuite aux ordures

FLOW

Descrizione del prodotto

- Lacca per parquet contenente acqua per sollecitazioni medie fino elevate
- Lacca poliuretanicca a due componenti con grado di lucentezza semioptico
- Elevate capacità di riempimento e di resistenza all'usura, buona resistenza ai prodotti chimici

Utilizzazione

Flow è una lacca contenente acqua, a due componenti e a base di dispersione poliuretanicca per il trattamento di superfici di parquet, di altri pavimenti in legno e di sughero. Flow è adatto sia per il settore abitativo sia per quello pubblico con sollecitazione normale. In caso di nuova laccatura si raccomanda un trattamento preventivo con una mano di fondo a base di acqua Prime oppure Seal per ridurre il rischio di incollatura fra i giunti. Per principio Flow non è una lacca adatta a rilaccare un parquet finito.

Si devono eseguire i seguenti lavori preparatori:

- Esecuzione accurata di una lamatura più fine possibile (ultima granulazione 120/150).
- Eseguire l'ultima lamatura del legno con una macchina a disco. Quanto più fine è la lamatura del legno tanto più facile sarà il lavoro di lamatura della lacca.
- Aggiungere il 10% di indurente al prodotto Flow e mescolare intensamente. Preparare una quantità di lacca necessaria solo per una mano. Mescolare in un recipiente vuoto piccolo la quantità di lacca con le rispettive quantità di indurente. Se si prepara un recipiente completo di lacca, l'indurente può essere versato nel recipiente stesso. Dopo aver mescolato vigorosamente e senza indugi per almeno 1 min., la lacca è pronta per l'utilizzazione e può essere applicata con l'apposito rullo.

Si raccomandano le seguenti fasi per eseguire la laccatura:

- 1 mano di lacca di fondo Prime oppure Seal con l'apposito rullo adatto. 2 (3) mani di Flow con l'apposito rullo. Il maggior numero di mani di Flow è raccomandato in caso di elevata sollecitazione oppure se si desidera ottenere una più lunga durata della laccatura.
- 1 mano di strato impregnante D-5. (Effetto: colorazione più intensa del legno, nessuna riduzione dell'incollatura fra i giunti).
- 2 (3) mani di Flow con l'apposito rullo.

Lamatura intermedia:

Prima dell'ultima mano eseguire una lamatura fine della lacca su tutta la superficie (per esempio rete con granulometria 150).

Tempo di essiccazione:

2-3 ore se l'applicazione avviene con il rullo (20°C/50 % di umidità dell'aria).

Percolabilità:

Dopo 8-12 ore il pavimento può essere percorso con prudenza.

Resistenza al carico:

Dopo 8-10 giorni il pavimento sopporta i carichi normali, l'applicazione di prodotti di cura e la posa di tappeti.

Temperatura per la lavorazione:

Almeno 15°C per il pavimento, per la lacca e per l'ambiente.

Quantità da applicare (consumo):

In caso di applicazione con rullo: 100 - 125 g/m², ossia 1 litro = 8 - 10 m².

Indicazioni importanti:

La componente della lacca Flow non è tossica (l'indurente appartiene alla classe di tossicità 4), non è combustibile ed è sensibile al gelo. Gli attrezzi da lavoro possono essere puliti dapprima con l'acqua, in seguito si raccomanda di pulirli con un solvente. Non smaltire nelle canalizzazioni i resti di lacca, ma lasciarli asciugare e gettarli nella spazzatura normale.

www.bauwerk-parkett.com
 Bauwerk Parkett AG CH-9430 St.Margrethen Tel. 071 747 74 74 Fax 071 747 74 75
 Bauwerk Parkett GmbH Eberhardstr. 50 D-72411 Bodelshausen Tel. 07471 700-0 Fax 07471 700-136
 Bauwerk-Kähns Parkett GmbH Gnigler Strasse 61 A-5020 Salzburg Tel. 0662 873 871 0 Fax 0662 872 982 34
 Huot Bauwerk Parkets 20 Avenue de la Gare F-10800 Saint Julien les Villas Tel. 03 25 82 54 05 Fax 03 25 75 39 88
 Bauwerk Parkett (UK) Unit 2 West 68 Bognor Road Chichester, West Sussex PO19 2NS/UK Phone 01243 792 199 Fax 01243 773 243

A 8 Nachweis der Brinellhärteformel

Beweis, dass die Brinellhärte mittels der Fläche der Kugelkalotte berechnet wird, sowohl mit der Formel nach DIN 1534 [20], als auch mit der Formel nach Stübi und Niemz [86].

Berechnung der Brinellhärte anhand des Durchmessers d der Kugelkalotte nach DIN 1534 [20]:

$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \text{D: Kugeldurchmesser, d: Durchmesser der Kugelkalotte}$$

da gilt $H_B = \frac{F}{A}$ A: Fläche der Kugelkalotte

daraus ergibt sich für $A = \frac{F}{H_B} = \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$

Berechnung der Brinellhärte anhand des Eindringweges der Kugel h nach Stübi und Niemz [86]:

$$H_B = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h}$$

da gilt $H_B = \frac{F}{A}$ A: Fläche der Kugelkalotte

daraus ergibt sich für $A = \frac{F}{H_B} = \pi \cdot D \cdot h$

Gemäss der technischen Formelsammlung von Gieck [33] gilt für die Berechnung der Kugelkalottenfläche:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \Rightarrow A = \pi \cdot D \cdot h$$

oder

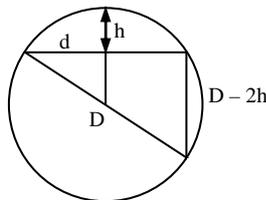
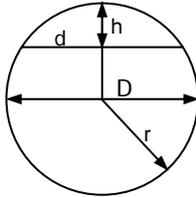
$$A = \frac{\pi}{4} (s^2 + 4 \cdot h^2); \text{ wobei } s \text{ in der Brinellhärteformel } d \text{ entspricht.}$$

$$\Rightarrow A = \frac{\pi}{4} (d^2 + 4 \cdot h^2)$$

Überführen der beiden Formeln von Gieck [33]: $A = \pi \cdot D \cdot h$ und $A = \frac{\pi}{4}(d^2 + 4 \cdot h^2)$ in die Formel zur

Berechnung der Kugelkalotte gemäss der Brinelhärteformel nach DIN 1534 [20]:

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$



Gemäss Pythagoras gilt:

$$(D - 2h)^2 = D^2 - d^2$$

$$D - 2h = \sqrt{D^2 - d^2}$$

$$2h = D - \sqrt{D^2 - d^2}$$

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

eingesetzt in Formel: $A = \frac{\pi}{4}(d^2 + 4 \cdot h^2)$

$$A = \frac{\pi}{4} \left[d^2 + 4 \left(\frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right)^2 \right]$$

$$A = \frac{\pi}{4} \left[d^2 + (D - \sqrt{D^2 - d^2})^2 \right]$$

$$A = \frac{\pi}{4} (d^2 + D^2 - 2D\sqrt{D^2 - d^2} + D^2 - d^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (2D^2 - 2D\sqrt{D^2 - d^2})$$

$$\underline{\underline{A = \frac{\pi}{2} (D^2 - D\sqrt{D^2 - d^2})}}$$

und eingesetzt in Formel: $A = \pi \cdot D \cdot h$

$$A = \pi \cdot D \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

$$\underline{\underline{A = \frac{\pi}{2} (D^2 - D\sqrt{D^2 - d^2})}}$$

q.e.d.