

Abschlussbericht zum BMBF-Verbund- vorhaben

„Wetterfeste Fassadenplatten aus modifizier- tem Holz“ (WEFAM-Holz)

Teilprojekt Uni Hamburg

Charakterisierung der biologischen Eigenschaften der Platten durch neuartige Kurzzeitprüfungen

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
„Nachhaltige Waldwirtschaft 2004 – 2008“
Schwerpunkt: Erschließung von Wertschöpfungspotentialen entlang der Forst-Holz-Kette

Laufzeit des Vorhabens:
Berichtszeitraum:

01.06.2005 – 31.05.2008
01.06.2005 – 18.02.2008

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 0330573A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Universität Hamburg
Zentrum Holzwirtschaft

Projektleitung

Bearbeitung

Prof. Dr. Peter Klein

Christian Brischke
Dr. Eckhard Melcher

Hamburg, 18.02.2008

Andrea Niemeyer

Inhalt

1	EINLEITUNG	5
1.1	GESAMTZIEL DES VORHABENS.....	5
1.2	BEZUG DES VORHABENS ZU DEN FÖRDERPOLITISCHEN ZIELEN.....	5
1.3	WISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ARBEITZIELE DES VORHABENS.....	5
1.4	THERMISCHE MODIFIKATION VON HOLZ	7
1.5	PROJEKTKONSTRUKTION/VERZÄHNUNG DER TEILPROJEKTE	9
1.6	HAUPTAUFGABEN DER UNIVERSITÄT HAMBURG:	10
1.7	WIRTSCHAFTLICHE ERFOLGSAUSSICHTEN	10
1.8	BEABSICHTIGTE UMSETZUNG DER ANGESTREBTEN FORSCHUNGSERGEBNISSE	11
2	MATERIAL UND METHODEN	12
2.1	AUSANGSMATERIAL	12
2.2	MESSDATENERMITTLUNG	13
2.2.1	<i>Masse</i>	13
2.2.2	<i>Dimension</i>	13
2.2.3	<i>Rohdichte</i>	13
2.2.4	<i>Holzfeuchte</i>	13
2.2.5	<i>Statistische Auswertungen</i>	14
2.3	BESTIMMUNG DER VERGÜTUNGSQUALITÄT DES AUSANGSMATERIALS	15
2.3.1	<i>High energy multiple impact test (HEMI-Test)</i>	15
2.3.1.1	Beschreibung der Methode.....	15
2.3.1.2	Optimierung der Kugelmischung	18
2.3.2	<i>Chemische Hydrolyse – Bestimmung des Decay Indicator Value (DIV)</i>	20
2.3.3	<i>L*a*b*-Farbwertbestimmung</i>	21
2.3.4	<i>Biologische Eigenschaften – Prüfung in Anlehnung an DIN EN 113 (1996)</i>	22
2.3.5	<i>Dimensionsstabilisierung – Bestimmung der Quellung</i>	23
2.3.6	<i>Kalibrierung der Prüfmethode an thermisch vergütetem Material</i>	24
2.4	PRÜFUNG DER VERGÜTUNGSQUALITÄT VON MATERIAL FÜR DIE INDUSTRIELLE PLATTENHERSTELLUNG 24	
2.5	ANWENDUNG DER HEMI-METHODE ZUR FÄULNISERKENNUNG	25
2.6	NATÜRLICHE BEWITTERUNG VON FASSADENPLATTEN IN HORIZONTALER DOPPELLAGE	25
2.6.1	<i>Bewertung der Freilandproben in Anlehnung an DIN EN 252 (1989)</i>	26
2.6.2	<i>Prüfung mittels HEMI-Test</i>	28
2.7	HEMI-TEST VON BESCHICHTETEN HÖLZERN	28
3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	29
3.1	ADAPTION UND KALIBRIERUNG DER PRÜFMETHODEN	29
3.1.1	<i>Optimierung der Kugelmischung</i>	29
3.1.2	<i>Masseabnahme der Prüfkörper nach thermischer Vergütung</i>	31
3.1.3	<i>Kalibrierung der Resistance to Impact Milling (RIM) für Lärche, Buche und Fichte</i>	31
3.1.4	<i>Kalibrierung des Decay Indicator Value (DIV) für Lärche, Buche und Fichte</i>	33
3.1.5	<i>Kalibrierung der Farbwertbestimmung</i>	35
3.1.6	<i>Kalibrierung der Methode zur Bestimmung der Quellungsvergütung</i>	36
3.2	QUALITÄTSPRÜFUNG DES AUSANGSMATERIALS FÜR DIE PLATTENHERSTELLUNG	38
3.2.1	<i>Resistance to Impact Milling (RIM)</i>	38
3.2.2	<i>Decay Indicator Value (DIV)</i>	40
3.2.3	<i>L*a*b* - Farbwerte</i>	40
3.2.4	<i>Dauerhaftigkeit nach DIN EN 113 (1996)</i>	41
3.2.5	<i>Anti Swelling Efficiency (ASE)</i>	44
3.3	VERGÜTUNGSQUALITÄT ZUSÄTZLICH HERGESTELLTEN AUSANGSMATERIALS.....	46
3.4	KALIBRIERREIHEN ZUR FÄULNISERKENNUNG (HEMI-TEST)	47
3.5	FÄULNISBEWERTUNG NACH 24-MONATIGER BEWITTERUNG IM FREILAND	49
3.6	RESISTANCE TO IMPACT MILLING (RIM) VON BESCHICHTETEN HÖLZERN.....	52
3.7	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	53
3.7.1	<i>Optimierung der Prüfmethode</i>	53
3.7.2	<i>Charakterisierung des Ausgangsmaterials</i>	53

4	VERZEICHNISSE.....	55
4.1	LITERATUR	55
4.2	ABBILDUNGEN	57
4.3	TABELLEN.....	58
4.4	GLEICHUNGEN	58

1 Einleitung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Ziel des Verbundvorhabens ist die nachhaltige Verwendung des einheimischen Rohstoffes Holz im Bauwesen durch Produktinnovation. Hierzu soll eine mehrlagige Platte aus modifiziertem Holz entwickelt werden, die einen schadensfreien Einsatz als großformatige Fassadenplatte ermöglicht.

In den aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen sollen Lösungsansätze sowohl für die Platte, als auch für die Beschichtung entwickelt werden. Durch diese Entwicklungen soll dem zunehmenden Wunsch von Bauherren und Architekten nach großflächigen Plattenwerkstoffen aus Holz Rechnung getragen werden.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

In dem interdisziplinären Verbund sollen Wertschöpfungspotentiale entlang der Forst-Holz-Kette erschlossen werden. Hierzu soll insbesondere die nachhaltige Verwendung des Rohstoffs Holz gefördert werden, wobei konkret ein Beitrag zu folgenden Unterzielen des Programms angestrebt wird:

- Verbesserung der Produkteigenschaften und Entwicklung von Holzwerkstoffen und -produkten unter Berücksichtigung des Verbraucher- und Umweltschutzes.
- Erschließung von Potentialen zur ganzheitlichen Nutzung von Holz unter Berücksichtigung des zukünftigen Holzarten- und Sortimentspektrums in der naturnahen Waldwirtschaft

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Das aktuelle Architekturdesign erfordert zunehmend glatte und wenig unterbrochene Fassaden, wobei der Trend zu großformatigen Fassadenbauteilen im Wohnungs- und Industriebau stark zunimmt. Bisher sind die hierfür aus Holz angebotenen Produkte nur begrenzt geeignet, um insbesondere den Vorstellungen der Nutzer hinsichtlich Dauerhaftigkeit und Pflegeintervallen gerecht zu werden.

Die Probleme sind zum Teil durch nicht materialgerechte Konstruktionen erklärbar. Zudem werden bei den Plattenwerkstoffen und den Anstrichstoffen noch wesentliche Entwicklungspotentiale vermutet. Im Rahmen des Gesamtprojektes soll durch seinen übergreifenden Ansatz eine Gesamtlösung entwickelt werden, die eine Verbesserung der bisher verfügbaren Werkstoffe aber auch der Beschichtungsverfahren und –produkte ermöglicht.

Gesamtziel des Projektes ist eine möglichst wetterfeste Fassadenplatte aus Holz zu entwickeln, die den Anforderungen der Verbraucher hinsichtlich Holzoptik und Wartungsintervallen sowie Dauerhaftigkeit gerecht wird. Hierfür sollen, aufbauend auf den aktuellen Kenntnisstand, folgende Teilziele erreicht werden:

- Eine Platte aus thermisch modifiziertem Holz, deren Herstellungstechnologie auch kleineren Unternehmen eine profitable Produktion ermöglicht.
- Angepasste Beschichtungstechnologien für diesen Werkstoff
 - eine effiziente Erstbeschichtung im Werk,
 - eine handwerkliche Beschichtung auf der Baustelle
 - ein Nacharbeiten von nachträglich angebrachten Schnittkanten (Ausschnitten, Kürzungen usw.) beschichteter Platten
 - eine Nachpflege bzw. Wartungsanstriche der großen Flächen mit vertretbarem Aufwand in ausreichend langen Intervallen.

Hierzu werden folgende Teilprojekte bearbeitet:

- Bewertung ökologischer Potentiale von Fassadenplatten aus Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen (Projektpartner: **PE Europe GmbH**)
- Ermittlung der Belastungssituation als Kriterium der zu erfüllenden Anforderungen (Projektpartner: **BBS**)
- Entwicklung wetterfester Mehrschichtplatten auf der Basis thermisch modifizierter Hölzer (Projektpartner: **IHD GmbH**)
 - a) aus bereits kommerziell verfügbaren Materialien Fichte/Lärche im OHT-Verfahren und als Heißluftbehandlung

- b) aus Buche als bisher für Modifikation wenig verwendetem heimischen Laubholz, das im Zuge des Umbaus der Wälder verstärkt anfallen wird
- Entwicklung von Beschichtungssystemen für Fassadenplatten (Projektpartner: **WKI**):
 - industriell flutbare Systeme
 - kompatible handwerkliche Beschichtungsprodukte (gemeinsam mit der Firma ICI / Desowag)
 - praxistaugliche Applikationswerkzeuge und -prozesse, die eine vollständige Absättigung von abgelängten bzw. zugeschnittenen Fassadentafelausschnitten in kritischen Bereichen (z.B. offenes Hirnholz) ermöglicht
 - Charakterisierung der biologischen Eigenschaften der Platten durch neuartige Kurzzeitprüfungen (Projektpartner: **Zentrum Holzwirtschaft der Uni Hamburg; Abt. Holzbiologie**)

Die Teilprojekte werden von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. koordiniert, die auch die Öffentlichkeitsarbeit für das Gesamtprojekt (ergänzend zu den eigenen Aktivitäten der Projektpartner) übernimmt.

1.4 Thermische Modifikation von Holz

Die Anfälligkeit von unbehandeltem Holz mit geringer natürlicher Dauerhaftigkeit erfordert für bestimmte Gebrauchsklassen einen Schutz gegenüber holzerstörenden Insekten und holzabbauenden Mikroorganismen. Aufgrund zunehmender Reglementierungen von Holzschutzmitteln wurden in den letzten Jahren in verschiedenen europäischen Ländern verstärkt Anstrengungen unternommen, biozidfreie Schutzmaßnahmen zu entwickeln und zu etablieren. Neben der Acetylierung oder Hydrophobierung hat die Hitzevergütung von Holz in Forschung und Industrie Bedeutung erlangt (Giebeler 1986; Dirol und Guyonnet 1993; Viitanen *et al.* 1994; Viitaniemi 1997; Gohar und Guyonnet 1998; Leithoff und Peek 1998; Sailer *et al.* 2000). Es wurden eine Reihe unterschiedlicher Verfahren entwickelt, wie z.B. das aus Finnland stammende Thermowood-Verfahren, das niederländische PLATO-Verfahren, das französische Retifications-Verfahren und das deutsche Öl-Hitze-Verfahren (Welzbacher und Rapp 2003; Brischke 2003; Welzbacher *et al.* 2004). Gemein ist diesen verschiedenen Verfahren das Holz einer Teilpyrolyse in sauerstoffarmer Atmosphäre zu unterziehen, so dass die Hemizellulosen gespalten und umgewandelt werden (Tjeerdsma *et al.* 1998;

Leithoff und Peek 1998). Die Schutzwirkung von thermisch modifiziertem Material beruht somit im Gegensatz zu chemisch geschütztem Holz auf einer Veränderung der Zellwandstruktur. Die für eine biologische Charakterisierung angewendeten Standardlaborprüfungen sind auf Grund des methodischen Ansatzes nur bedingt für eine Prüfung von thermisch modifiziertem Material geeignet. Dennoch wurde in der Vergangenheit die biologische Beständigkeit von thermisch modifiziertem Holz mittels standardisierten Laborprüfungen untersucht und die Schutzwirkung nachgewiesen (Viitaniemi 1997; Gohar und Guyonnet 1998; Leithoff und Peek 1998; Rapp und Sailer 2000; Rapp und Sailer 2001). Nachteilig ist jedoch, dass es in Folge der Hitzbehandlung zu Festigkeitseinbußen im statischen und besonders im dynamischen Bereich im Vergleich zu unbehandeltem Holz durch die prozessbedingte Masseabnahme kommt (Seborg *et al.* 1953; Buro 1954; Burmester 1973; Jämsä und Viitaniemi 1998; Gyuhyeok *et al.* 1998; Kamdem *et al.* 1999; Jämsä und Viitaniemi 2000; Sailer *et al.* 2000; Vernois 2000). Diese Minderung der physikalischen Holzeigenschaften steht in einem direkten Zusammenhang mit der für die Holzvergütung eingesetzten Prozesstemperatur und -dauer (Burmester 1973; Giebler 1986; Ruyter und Hortulanus 1995; Viitaniemi 1997; Gyuhyeok *et al.* 1998; Leithoff und Peek 1998).

An der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Seit dem 1. Januar 2008 ist die bisherige Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Teil des neu gegründeten Johann Heinrich von Thünen- Instituts, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI)) wurden verschiedene Methoden zur Prüfung von thermisch modifiziertem Material entwickelt, um die Eigenschaften über chemische und enzymatische Hydrolyse (Rapp *et al.* 2003) oder durch Bestimmung der strukturellen Integrität (HEMI = High Energy Multiple Impact) zu charakterisieren. Im Weiteren wurden die Prüfmethoden unter besonderer Berücksichtigung der Struktur des vergüteten Materials optimiert. Damit werden sowohl Aussagen über die Vergütungsqualität des geprüften Materials auch ohne zugeordnete Nullproben möglich, als auch Aussagen über die zu erwartende Dauerhaftigkeit in Standardlaborprüfungen. Weiterhin ist die Detektierung von Pilzbefall unter Laborbedingungen mittels HEMI-Prüfung untersucht worden.

Der Einsatz dieser Methoden ist an Fichtenvollholz eingehend untersucht und optimiert worden. Jedoch ist sie bisher nicht zur Charakterisierung der biologischen und mechanischen Eigenschaften von Dreischichtplatten die aus verschiedenen modifizier-

ten Materialien hergestellt wurden eingesetzt worden. Gerade die Verwendung des vergüteten Holzes in einem modernen, auf die Anwendung abgestimmten Verbundwerkstoff ist für einen erfolgreichen, nachhaltigen Einsatz notwendig. Deshalb sollen in diesem Forschungsprojekt diese beiden Methoden zur Charakterisierung der biologischen Eigenschaften von Fassadenplatten aus verschiedenen modifizierten Hölzern angewendet werden. Hiermit eingeschlossen ist die Validierung der Methoden durch parallel mitgeführte Vollholzproben und Standardlaborprüfungen.

1.5 Projektkonstruktion/Verzahnung der Teilprojekte

Projektbasis ist, dass der Partner **IHD** zunächst modifiziertes Holz aus am Markt etablierten Prozessen zu Massivholzplatten verarbeitet. Schon aus Gründen der Verfügbarkeit solcher Materialien ist nicht geplant, neue Verfahren oder Prozesse zur Holzvergütung innerhalb dieses Projektes zu entwickeln. Vielmehr sollen die Holzarten Fichte, Lärche und Buche verwendet werden, wobei die optimalen Parameter zur industriellen Modifizierung von Buche noch nicht in dem Ausmaß bekannt sind. Entsprechende Entwicklungsarbeiten sind aber in Angriff genommen. Durch die geringeren Quell- und Schwindbewegungen der modifizierten Ausgangsmaterialien wird erwartet, dass auch die Anforderungen an die Beschichtung deutlich geringer sind und hier neue Entwicklungsansätze geeigneter Beschichtungssystem und -verfahren entstehen.

Während die Materialeigenschaften der aus den unterschiedlichen Vergütungsprozessen stammenden Hölzer bereits bekannt sind, ist derzeit völlig unklar, in wieweit die (Roh)Platten die Anforderungen hinsichtlich der Formstabilität erfüllen und welche Faktoren (Schichtenfolge, Schichtdicken, Deckbrettbreiten, Verleimung) qualitätsentscheidend sind.

Da die Prüfungen der Dimensionsstabilität größere Plattenabmessungen erfordern, können Laboruntersuchungen nur Teilaussagen liefern. Ein Teil der Versuche wird im Freiland durchgeführt.

Parallel sollen Simulationsrechnungen des Projektpartners **BBS** Aussagen darüber liefern, welche (Ausgleichs) - Feuchtebelastungen klimabedingt im Werkstoff auftreten können. Die hierfür benötigten Klimadatensätze und Simulationsprogramme liegen vor.

Bei der Verwendung von modifiziertem Holz sind für den Verarbeiter folgende Informationen wichtig:

- die im eigentlichen Modifikationsprozess erreichte Vergütungsqualität
- die im nachgeschalteten Prozess der Verarbeitung erzeugte Produktqualität

1.6 Hauptaufgaben der Universität Hamburg:

- Optimierung von Schnell-Testmethoden zur Charakterisierung der biologischen und mechanischen Eigenschaften von Fassadenplatten aus modifiziertem Holz.
- Optimierung von Schnell-Testmethoden zur Fäulniserkennung nach natürlicher Freibewitterung von Fassadenplatten aus modifiziertem Holz.
- Qualitätsbestimmung des Ausgangsmaterials für die Herstellung von Fassadenplatten aus modifiziertem Holz.
- Qualitätsbestimmung von industriell hergestellten Fassadenplatten aus modifiziertem Holz.

1.7 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Anliegen des Forschungsprojektes ist es, Grundlagen zum Einsatz von vergüteten Hölzern in mehrlagigen Massivholzplatten zu erarbeiten und deren praktische Umsetzung zu ermöglichen. Die zu entwickelnde Herstellungstechnologie stellt keine über den Stand der Technik hinausgehenden Anforderungen an die Holzwerkstoffunternehmen und die Verarbeiter. Die mit vergüteten Hölzern hergestellten mehrlagigen Massivholzplatten erfordern keine neuen Produktionsanlagen, können mit einfachen Holzbearbeitungsmaschinen verarbeitet werden und benötigen keine produktionsfremden Kleb- oder Beschichtungsstoffe. Sie besitzen eine höhere Dauerhaftigkeit und ermöglichen folglich neue Einsatzgebiete. Nicht zuletzt ist auch aus Sicht der Bauindustrie die Entwicklung dauerhafter, witterungsbeständiger Bauteile zukunfts-trächtig. Insbesondere kleinere und mittlere Unternehmen können durch innovative Produkte ihre wirtschaftliche Stellung stärken. Bei einer möglichen Steigerung der Produktion ist mit der Schaffung neuer Arbeitsplätze zu rechnen.

1.8 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die beteiligten Projektpartner unterhalten zahlreiche Kontakte zu Wirtschaft und Verbänden und sind auch selbst in nationale und internationale Forschungskreise eingebunden. Die Beteiligung der Industriepartner trägt dazu bei, dass praktische Erfahrungen eingebracht werden und eine direkte Umsetzung der Ergebnisse im Industriezweig möglich wird. Publikationen von Projektergebnissen werden vorzugsweise in der Fachliteratur der Holzbe- und Holzverarbeitung, des Holzbaus und der Holzwirtschaft sowie für technische Textilien vorgenommen. Weiterhin werden Forschungsergebnisse auf Tagungen oder Messen in Form von Vorträgen oder Postern der Öffentlichkeit präsentiert. Gleiches gilt für Vorträge bei Herstellern und Anwendern.

2 Material und Methoden

2.1 Ausgangsmaterial

Im Rahmen des Projektes wurden folgende Ausgangsmaterialien hinsichtlich der Vergütungsqualität untersucht (Tabelle 1).

No.	Material	Holzart	Beschreibung	ID	Lieferform
1.	Fichte	<i>Picea abies</i> Karst.	unbehandelt	F	Brett
2.	Fichte OHT	<i>Picea abies</i> Karst.	Öl-Hitze-behandelt	FO	7 mm Lamelle
3.	Fichte HT	<i>Picea abies</i> Karst.	PLATO-hitzebehandelt	FH	7 mm Lamelle
4.	Lärche	<i>Larix decidua</i> Mill.	unbehandelt	L	7 mm Lamelle
5.	Lärche OHT	<i>Larix decidua</i> Mill.	Öl-Hitze-behandelt	LO	7 mm Lamelle
6.	Lärche HT	<i>Larix decidua</i> Mill.	PLATO-hitzebehandelt	LH	7 mm Lamelle
7.	Buche	<i>Fagus sylvatica</i> L.	unbehandelt, gedämpft	B	Brett
8.	Buche HT	<i>Fagus sylvatica</i> L.	MIRAKO-hitzebehandelt	BH	Brett
9.	Kiefer	<i>Pinus sylvestris</i> L.	unbehandelter Splint	KS	Lagerbestand

Die Hitzebehandlung der Positionen No. 2. und No. 5. wurde von der Firma Menz Holz in Ehrenberg/Reulbach als Öl-Hitze-Behandlung (OHT) ausgeführt, die Positionen No. 3. und No. 6. wurden nach dem PLATO-Verfahren thermisch vergütet. Die Hitzebehandlung des Buchensortimentes No. 8. erfolgte durch die Firma Mittemramskogler in Gaffenz, Österreich. In den noch folgenden Abbildungen und Tabellen werden die in Tabelle 1 angeführten Identifikationen (ID) für die verschiedenen Materialien verwendet.

2.2 Messdatenermittlung

2.2.1 Masse

Zur Bestimmung der Masse der Prüfkörper wurde eine Oberschalenwaage der Firma Gottlieb Kern & Sohn aus Albstadt verwendet. Die Massen wurden auf 0,01 g genau ermittelt.

2.2.2 Dimension

Alle Längenmaße der einzelnen Prüfkörper wurden mit Hilfe einer Messschraube auf 0,01 mm genau bestimmt.

2.2.3 Rohdichte

Die Rohdichte der Prüfkörper wurde gravimetrisch nach DIN 52 182 (1976) bestimmt. Hierzu wurden die Abmessungen der einzelnen Prüfkörper nach Konditionieren im Normklima bei 20 ± 2 °C Lufttemperatur und 65 ± 5 % relativer Luftfeuchte bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte mit Hilfe einer Messschraube ermittelt und das Volumen aus dem Produkt der Seitenlängen berechnet. Das berechnete Volumen wurde durch die nach dem Konditionieren gemessene Masse geteilt. Der Quotient aus Masse und Volumen wurde auf 0,01 g/cm³ genau angegeben.

Gleichung 1: Rohdichte

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}$$

m_u = Masse bei Holzfeuchte u in g

V_u = Volumen bei Holzfeuchte u in cm³

ρ_u = Rohdichte bei Holzfeuchte u in g/cm³

2.2.4 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte der Prüfkörper wurde gravimetrisch nach DIN 52 183 (1977) ermittelt. Zunächst wurden sie gewogen (m_u) und anschließend in einem Trockenschrank (Firma Heraeus Instruments GmbH) für 16 Stunden bei 103 °C gedarrt. Danach wurden die Prüfkörper in einem Exsikkator abgekühlt und erneut gewogen (Masse_{darrtrocken}). Die Holzfeuchte wurde gemäß Gleichung 2 berechnet :

Gleichung 2: Holzfeuchte

$$u = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \%$$

m_u = Masse bei Holzfeuchte u in g
 m_{dtr} = Masse_{darrtrocken} in g
u = Holzfeuchte in %

2.2.5 Statistische Auswertungen

Die statistischen Auswertungen wurden unter Verwendung der folgenden Berechnungsgrößen und mathematischen Beziehungen durchgeführt (Gleichung 3-5).

Gleichung 3: Mittelwert

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

\bar{x} = arithmetisches Mittel
n = Umfang der Stichprobe

Gleichung 4: Varianz ($s \geq 0$)

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

s^2 = Varianz

Gleichung 5: Standardabweichung

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

s = Standardabweichung

Weiterhin wurde das Konfidenzintervall zur Eingrenzung und Abschätzung des Erwartungswertes μ berechnet. Hierzu wurde die mathematische Größe $\pm t_{\alpha;m}$ herangezogen, die abhängig von der t-Verteilung von $m = n - 1$ Freiheitsgraden und der Irrtumswahrscheinlichkeit α ist.

Gleichung 6: Konfidenzintervall

$$\bar{x} - t_{\alpha,m} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha,m} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Das für $\alpha = 0,05$ resultierende 95 %-Konfidenzintervall bedeutet, dass mit einer Sicherheit von 95 % der Erwartungswert μ innerhalb dieses Bereiches liegt.

Unterschiedliche Mittelwerte \bar{x}_1 und \bar{x}_2 zweier unabhängiger Stichproben des Umfangs n_1 und n_2 aus näherungsweise normalverteilten Grundgesamtheiten wurden mittels t-Test nach Student verglichen. Die berechnete Prüfgröße \hat{t} wurde hierbei zum Bestimmen der Signifikanz verwendet. Sobald sie den kritischen Wert der Studentverteilung für $m = n - 1$ für die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ überschritt, wurde die Nullhypothese abgelehnt. Dabei wurde die Mittelwertsdifferenz für $\alpha \leq 0,001$ als höchst signifikant, für $\alpha \leq 0,01$ als hochsignifikant und für $\alpha \leq 0,05$ als signifikant bewertet.

Gleichung 7: Prüfgröße \hat{t} nach Student

$$\hat{t} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

2.3 Bestimmung der Vergütungsqualität des Ausgangsmaterials

Das für die Herstellung von Fassadenplatten vorgesehene Ausgangsmaterial wurde mittels verschiedener Prüfmethode hinsichtlich der Vergütungsqualität charakterisiert. Die Methoden zur Bestimmung der Vergütungsqualität werden im folgenden dargestellt.

2.3.1 High energy multiple impact test (HEMI-Test)

2.3.1.1 Beschreibung der Methode

Im HEMI-Test werden Prüfkörper der Dimension $10 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ (long. x rad. x tang.) durch unterschiedliche, hochenergetische Einwirkungen beansprucht, wodurch multiple Brüche an den Prüfkörpern hervorgerufen werden (Rapp et al. 2006). Je fünf

Prüfkörper (= 20 cm³ Gesamtvolumen) werden durch sieben Stahlkugeln unterschiedlicher Durchmesser zerschlagen (1 x 35 mm, 3 x 12 mm und 3 x 6 mm), die in einem Edelstahlschlagbecher (140 mm innerer Durchmesser, 48 mm Höhe; Abbildung 1) einer Schwingscheibenmühle (Typ HSM 100; Herzog Maschinenfabrik, Osnabrück) beschleunigt werden.

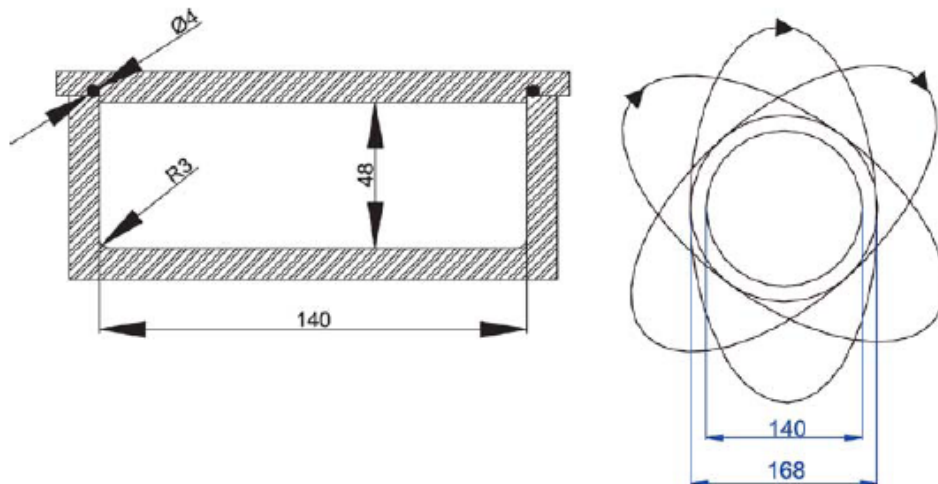


Abbildung 1: Schnitzzeichnung eines Edelstahlschlagbechers zur Durchführung des HEMI-Tests in einer Schwingscheibenmühle (links) und Aufsicht mit Richtungspfeilen zur Verdeutlichung der typisch rotierenden Bewegung (rechts)

Der Edelstahlschlagbecher wird für 60 Sekunden mit einer Rotationsfrequenz von 23,3 s⁻¹ und einem Hub von 12 mm beschleunigt, um multiple dynamische Beanspruchungen durch die Stahlkugeln auf die Prüfkörper zu bewirken. Die Bruchfragmente von insgesamt zehn Prüfkörpern (= 40 cm³ Gesamtvolumen) werden über Schlitzsiebe verschiedener Weite auf einem kreisförmig rotierenden Horizontalschüttler mit einem Hub von 25 mm und einer Rotationsfrequenz von 250 min⁻¹ für 10 Minuten in 5 Chargen fraktioniert.

- Fraktion 1 (F1) >5 mm Grobfraktion
- Fraktion 2 (F2) 3–5 mm
- Fraktion 3 (F3) 2–3 mm
- Fraktion 4 (F4) 1–2 mm
- Fraktion 5 (F5) <1 mm Feinfraktion

Die anfallenden Siebfraktionen werden anschließend gewogen.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Edelstahlschlagbecher mit Fragmenten hitzebehandelter Prüfkörper einschließlich der verwendeten Kugeln nach der HEMI-Prüfung



Abbildung 2: HEMI-Prüfung: Edelstahlschlagbecher samt Fragmenten und Stahlkugeln

Aus den Siebfractionen F1-5 wird die Resistance to Impact Milling (RIM) nach Gleichung 8 – 9 berechnet, wobei die RIM Werte von 0-100% annehmen kann.

Gleichung 8: Berechnung der RIM

$$RIM = (I - 3FA + 300) / 4 \quad [\%]$$

I = Integritätsgrad

FA = Feinanteil

Der Feinanteil FA ist das Verhältnis der Masse der Feinfraktion (<1 mm) zur Gesamtmasse aller Siebfractionen m_{Gesamt} in %. Der Integritätsgrad I ist das Verhältnis der Masse der 10 größten Reststücke ($m_{10 \text{ größte Reststücke}}$) nach der Zerkleinerung zur Gesamtmasse aller Siebfractionen m_{Gesamt} , wobei gilt:

Gleichung 9: Integritätsgrad I

$$I = \frac{m_{10 \text{ größte Reststücke}}}{m_{\text{Gesamt}}} * 100 \quad [\%]$$

Die Herleitung der Berechnungsgrößen ist in Rapp *et al.* (2006) beschrieben.

2.3.1.2 Optimierung der Kugelmischung

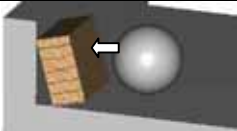
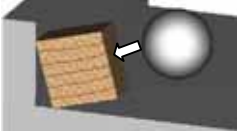
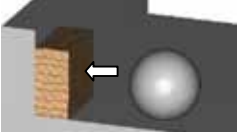
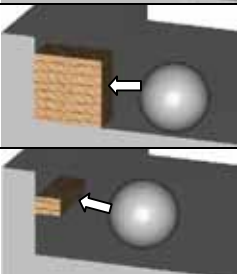
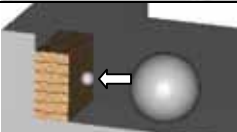
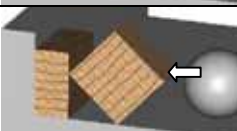

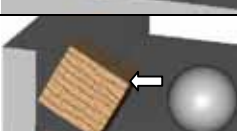

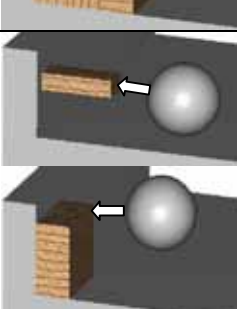
Bedingt durch den Einsatz lamellenförmiger Materialien (Tabelle 1) wurden vom HEMI-Test abweichend Prüfkörper der Dimension 10 x 5 x 20 mm³ (long. x rad. x tang.) verwendet. Für das Zerschlagen wurden 20 Prüfkörper (= 20 cm³ Gesamtvolumen, siehe 2.3.1.1) eingesetzt. Das neue Prüfkörperformat erforderte eine Optimierung der Testmethode hinsichtlich des Einsatzes einer geeigneten Kugelmischung, um die verschiedenen Materialien, bzw. um Hitzebehandlungsintensitäten zuverlässig zu unterscheiden. Hierzu wurden verschiedene Kugelmischungen auf die RIM von longitudinal zugeordneten Prüfkörpern aus unbehandelter und hitzebehandelter Fichte sowie Buche untersucht (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anzahl der Prüfkörper für Versuche zur Optimierung der Kugelmischung

		Anzahl und Durchmesser der großen Kugeln			
Holzart	Behandlung	1 x 35 mm	1 x 40 mm	2 x 40 mm	3 x 40 mm
Fichte	unbehandelt	40	40	40	40
	220 °C/ 2 h	40	40	40	40
	220 °C/ 4 h	40	40	40	40
Buche	unbehandelt	40	40	40	40
	220 °C/ 2 h	40	40	40	40
	220 °C/ 4 h	40	40	40	40

Durch den Einsatz verschieden großer Stahlkugeln lässt sich die dynamische Schlagenergie auf die Besonderheiten des zu prüfenden Materials anpassen. Die kleineren Stahlkugeln (3 x 12 mm und 3 x 6 mm Durchmesser) sind im Gegensatz zur großen Stahlkugel nicht für das Zerschlagen der Prüfkörper verantwortlich, sondern die Bruchstücke aus den für die große Kugel unzugänglichen Randbereichen des Schlagbechers zu befördern. Nachfolgende Tabelle 3 zeigt beispielhaft die während der HEMI-Prüfung auftretenden Beanspruchungen.

Tabelle 3: Übersicht der während der HEMI-Prüfung auftretenden Beanspruchungsarten, zugeordnete Praxisbeispiele und entsprechende Normprüfungen

Fall	Schema	Praxis-Beanspruchung	HEMI	Norm-Prüfung	Abgewandelte Normprüfung
1		?	Schlag-Biegung auf Hirnholz	keine	Schlagbiege-Versuch auf Hirnholzproben
2		Windböen, Zuschlagen von Fenstern und Türen	Schlag-Biegung	Schlagbiege-Versuch (dynamisch)	
3a		Abdrücke beim Verbauen oder Stoßbeschädigungen nach Einbau; fallende Gegenstände auf Parkett	Schlag-Druck auf Hirnholz	Härteprüfung (dynamisch)	
3b		Abdrücke beim Verbauen oder Stoßbeschädigungen nach Einbau; fallende Gegenstände auf Parkett	Schlag-Spalt	Härteprüfung (dynamisch)	
4a		Nageln, Schießen	Schlag-Spalt	Spaltfestigkeitsprüfung (statisch)	
4b		Nageln, Schießen	Schlag-Scherung (Kantenscherung)	Spaltfestigkeitsprüfung (statisch)	
5a		Stoßbeschädigung bei Transport und Einbau; Abrieb durch Schuhwerk	Schlag-Scherung	Druck-Scherfestigkeit (statisch)	Schlagbiege-Versuch auf Hirnholzproben
5b		Vorhölzer, Knotenverbindungen	Schlag-Scherung	Druck-Scherfestigkeit (statisch)	
5c		Vorhölzer, Knotenverbindungen	Schlag-Scherung	Druck-Scherfestigkeit (statisch)	
6		?	Schlag-Knick	Knickfestigkeit (statisch)	

2.3.2 Chemische Hydrolyse – Bestimmung des Decay Indicator Value (DIV)

Da ein direkter Zusammenhang zwischen Massenabnahme durch Hitzebehandlung und dem Masseverlust des hitzebehandelten Materials durch Abbau nach Pilzangriff besteht (Rapp et al. 2003), ist die Bestimmung des Restkohlenhydratgehaltes eine geeignete Methode, um den Vergütungserfolg ohne zeitaufwendige Pilzversuche zu bestimmen. Der Gesamtkohlenhydratgehalt wurde für alle Materialien (Tabelle 1) bestimmt.

Ca. 400 mg des jeweiligen Ausgangsmaterials wurden 90 s mit einer Scheibenschwingmühle fein gemahlen und in einem 50 ml-Messkolben bei Raumtemperatur 1 h mit 20 ml H₂O (ionenfrei) bei 150 min⁻¹ geschüttelt. Die Suspension wurde über ein Glasfaserfilter filtriert und das Filtrat auf den Kohlenhydratgehalt photometrisch analysiert. Das Filtergut wurde 16 h bei 100 °C getrocknet und anschließend je ca. 100 mg mit 5 ml 1%iger Schwefelsäure und einem Netzmittel für 1 h bei 100 °C im TR205 Thermoblock (Merck) extrahiert und danach filtriert. Die extrahierten Kohlenhydrate wurden dann im Filtrat analysiert.

Für die Quantifizierung der extrahierten Kohlenhydrate wurde 1 ml Filtrat mit 2 ml Dihydroxytoluol-Lösung im Reagenzglas gemischt, 15 min bei 100 °C im Thermoblock erwärmt, auf Raumtemperatur abgekühlt und gegen einen wässrigen Blindwert bei 540 nm mit einem SQ115 Filterphotometer (Merck) photometriert. Die Auswertung erfolgte nach einer mit Glucose erstellten Kalibriergeraden in einem Messbereich von 1 bis 200 µg. Der Zusammenhang von Gesamtkohlenhydratgehalt zu Masseabnahme durch Hitzebehandlung geht beispielhaft aus Abbildung 3 hervor.

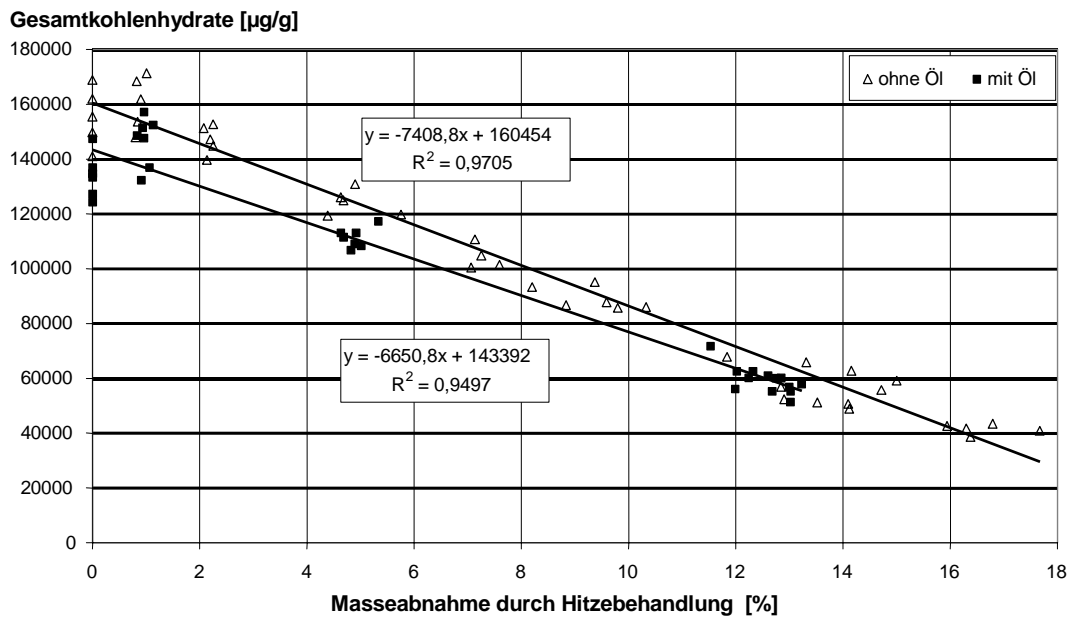


Abbildung 3: Korrelation aus Gesamtkohlenhydratgehalt von Fichte und Masseabnahme durch Öl-Hitzebehandlung oder einer Luft-Hitzebehandlung von Fichtenproben; aus: Rapp et al. 2003

2.3.3 L*a*b*-Farbwertbestimmung

Die Farbveränderung durch thermische Modifikation von Holz wurde mittels Minolta Chromameter CR-200 im CIE L*a*b* Farbraum bestimmt. Der CIE L*a*b* Farbraum stellt eine Farbe durch Beschreibung der hell-dunkel Komponente L*, der blau-gelb Komponente b* und der grün-rot Komponente a* dar (Abbildung 4).

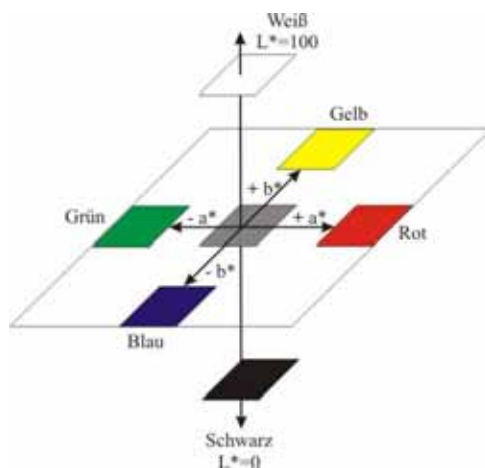


Abbildung 4: Schematische Darstellung des CIE-Lab-Farbsystems. Das CIE-Lab-Farbsystem basiert auf den so genannten psychologischen Grundfarben Rot, Grün, Blau und Gelb, aus denen sich das psychometrische Farbdigramm konstruieren lässt.

Um die natürliche Farbvariation von Holzoberflächen so gering wie möglich zu halten, wurden die Prüfkörper vor der Farbmessung durch Mahlung in einer Schwingschei-

benmühle homogenisiert. Die Messung erfolgte auf dem Mahlgut an drei Messpunkten. Für die Bestimmung der Vergütungsqualität wurden Korrelationen zwischen den Farbwerten und der Massenabnahme durch thermische Modifikation mit Hilfe von definiert vergüteten Prüfkörpern erstellt.

2.3.4 Biologische Eigenschaften – Prüfung in Anlehnung an DIN EN 113 (1996)

Die biologischen Eigenschaften des verschieden modifizierten Vollholzes stellten eines von mehreren Kriterien für die Auswahl geeigneter Materialien für die Herstellung von Fassadenplatten dar. Es wurden Abbauversuche in Anlehnung an DIN EN 113 (1996) durchgeführt. Hierzu wurden Petrischalen aus Kunststoff (Durchmesser 96 mm) und Prüfkörper des Formats $10 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ (long. x tang. x rad.) verwendet. Folgende Pilzstämme wurden für die Untersuchungen eingesetzt: *Poria placenta* var. *Monticula* = (Fr.) Gilbertson et Ryv. FPRL 280 BAM, 8/1997 und *Coriolus versicolor* = (L.:Fr.) Pilat CTB 863A; 1969.

Die Anfangstrockenmasse m_0 der Prüfkörper wurde nach 16 h Darren im Trockenschrank bei $103 \pm 2 \text{ °C}$ bestimmt. Anschließend wurden die Prüfkörper in die von den Prüfpilzen bewachsenen Kulturgefäße eingebracht. Jeweils drei Versuchsproben und eine Kontrollprobe wurden in ein Kulturgefäß eingebaut. Nach acht Wochen Inkubation erfolgte der Ausbau. Die Prüfkörper wurden anschließend gedarrt und gewogen, um die Trockenmasse m_1 zu ermitteln. Der Masseverlust durch Pilzangriff wurde gemäß Gleichung 10 berechnet.

Gleichung 10: Masseabnahme durch Pilzangriff:

$\Delta m = (m_0 - m_1) - k$	<table style="border-collapse: collapse; margin-left: 10px;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">m_0</td> <td>= Anfangstrockenmasse in g</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">m_1</td> <td>= endgültige Trockenmasse in g</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">Δm</td> <td>= Masseabnahme in g</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 10px;">k</td> <td>= Korrekturwert</td> </tr> </table>	m_0	= Anfangstrockenmasse in g	m_1	= endgültige Trockenmasse in g	Δm	= Masseabnahme in g	k	= Korrekturwert
m_0	= Anfangstrockenmasse in g								
m_1	= endgültige Trockenmasse in g								
Δm	= Masseabnahme in g								
k	= Korrekturwert								

Um eine Klassifizierung des Materials analog den Dauerhaftigkeitsklassen zu ermöglichen, wurde die relative Dauerhaftigkeit der modifizierten Materialien als Quotient auf unbehandelte Kiefer-Splint-Kontrollen bezogen (x-Wert, DIN EN 350-1; 1994).

2.3.5 Dimensionsstabilisierung – Bestimmung der Quellung

Zur Bestimmung der Dimensionsstabilisierung wurden Quellungsversuche in Anlehnung an DIN 52 184 (1984) mit Prüfkörpern der Dimension 20 x 20 x 5 mm³ (long. x rad. x tang.) durchgeführt. Die darrtrockenen Prüfkörper wurden für 24 h in 60°C warmen Wasser gelagert. Je Material (Tabelle 1) wurden 20 Prüfkörper zur Bestimmung der Quellung verwendet. Die maximale Quellung α in tangentialer und radialer Richtung wurde nach Gleichung 11 bestimmt:

Gleichung 11: maximale Quellung α

$$\alpha = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\min}} \cdot 100\%$$

S_{\min}	= Länge darrtrocken
S_{\max}	= Länge maximal gequollen

Aus der radialen und tangentialen maximalen Quellung α wurde die mittlere maximale Quellung (Gleichung 12) berechnet:

Gleichung 12: mittlere maximale Quellung

$$\text{mittlere maximale Quellung} = (\text{maximale Quellung}_{\text{radial}} + \text{maximale Quellung}_{\text{tangential}}) / 2$$

Diese bildet die Basis für die Berechnung (Gleichung 13) der Anti-Swelling-Efficiency (ASE).

Gleichung 13: ASE

$$ASE = \frac{(\text{mittlere max. Quellung}_{\text{Kontrolle}} - \text{mittlere max. Quellung}_{\text{modifiziertes Material}})}{\text{mittlere max. Quellung}_{\text{Kontrolle}}} \cdot 100\%$$

Die ASE ist somit ein Maß der Quellungsvergütung, hervorgerufen durch die Modifikation.

2.3.6 Kalibrierung der Prüfmethode an thermisch vergütetem Material

Die in diesem Projekt angewandten Prüfmethode (HEMI, DIV) wurden bisher nur zur Charakterisierung der Vergütungsqualität von Fichtenholz durch eine Hitzebehandlung entwickelt, weshalb für die Bestimmung der Vergütungsqualität von hitzebehandelter Lärche und Buche eine Kalibrierung dieser Prüfkörper notwendig war. Auf Grund abweichender Prüfkörperperformate wurde auch für Fichte eine zusätzliche Kalibrierung durchgeführt. Jeweils 360 Prüfkörper der Dimension $10 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$ (long. x tang. x rad.) aus Buche, Lärche und Fichte wurden in Gruppen von 10 Prüfkörpern je Material luftdicht in Aluminiumfolie verpackt und bei 220 °C im Umlufttrockenschrank thermisch vergütet. Unterschiedliche Masseabnahmen der Prüfkörperpakete wurden durch verschiedene Zeitintervalle der thermischen Vergütung erreicht (Tabelle 4).

Tabelle 4: Zeitintervalle der thermischen Vergütung der Prüfkörper für Versuche zur Kalibrierung der Prüfmethode

Material	Dauer der thermischen Vergütung bei 220°C in h												
Fichte	0,00	0,08	0,17	0,33	0,50	0,75	1,50	2,67	3,00	3,67	4,67	6,00	8,00
Lärche	0,00	0,08	0,17	0,33	0,50	0,75	1,50	2,67	3,00	3,67	4,67	6,00	8,00
Buche	0,00	0,08	0,17	0,25	0,33	0,50	0,67	0,75	1,00	1,25	1,50	2,25	3,00

Die unbehandelten und verschieden intensiv thermisch modifizierten Prüfkörper aus Buche, Lärche und Fichte wurden anschließend mittels HEMI-Test (2.3.1) geprüft und hinsichtlich des Gesamtkohlenhydratgehaltes (2.3.2) untersucht. Auf Basis der HEMI- und DIV-Ergebnisse wurden Kalibrierkurven zur Korrelation von Masseabnahme durch Hitzebehandlung zur Eigenschaftsveränderung erstellt.

2.4 Prüfung der Vergütungsqualität von Material für die industrielle Plattenherstellung

Zusätzlich hergestelltes thermisch modifiziertes Holz für die industriell durchgeführte Produktion von Dreischichtplatten wurde analog zu dem in 2.1 beschriebenen Materialien hinsichtlich RIM (cf. 2.3.1) charakterisiert. Hierbei handelte es sich um Lärche OHT (LO) und Buche Mirako (BH).

2.5 Anwendung der HEMI-Methode zur Fäulniserkennung

Der Einsatz der HEMI-Methode zur Detektion eines Pilzangriffs erfordert die Erstellung von Korrelationen zwischen RIM und dem Masseverlust durch Pilzabbau. Hierzu wurden Abbauversuche mit unbehandelter Lärche, Buche und Fichte unter Verwendung der Prüfpilze *Coniophora puteana* und *Coriolus versicolor* durchgeführt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Inkubationsintervalle und Prüfkörperanzahl der verschiedenen Holzart/Prüfpilz-Kombinationen zur Erstellung von Kalibrierkurven für die Fäulnisfrüherkennung (C.v. = *Coriolus versicolor*, C.p. = *Coniophora puteana*)

Prüfkörperanzahl	Inkubationsintervall [d]					
	B/C.v.	B/C.p.	L/C.v.	L/C.p.	F/C.v.	F/C.p.
24	0	0	0	0	0	0
24	8	8	8	8	8	8
24	10	13	10	10	13	13
24	13	16	13	13	16	16
24	16	17	16	16	17	17
24	17	20	17	17	20	20
24	20	23	20	20	27	23
24	23	27	27	23	34	27
24	27	30	34	27		30
24	34	34		30		34
30	38	38		34		38

2.6 Natürliche Bewitterung von Fassadenplatten in horizontaler Doppellage

Die acht verschiedenen Ausgangsmaterialien (cf. 2.1), wie auch im Labormaßstab hergestellte Fassadenplatten (Tabelle 6) wurden in Gebrauchsklasse 3 (GK3) frei bewittert.

Hierzu wurden Prüfkörper (Ausgangsmaterial: 500 x 5 x 50 mm³, n=15, Laborplatten: 500 x 15 x 50 mm³, n=6) in einer horizontalen Doppellage exponiert. Die Prüfkörper wurden in zwei horizontalen, um eine halbe Prüfkörperbreite versetzten Lagen angeordnet. Mit der horizontalen Anordnung wurde die Situation einer Wasserfalle nachgestellt (Abbildung 5). Auf diese Weise sammelte sich Niederschlagswasser zwischen den Lagen und verdunstete dort nur langsam.

Tabelle 6: Plattentypbezeichnungen und –aufbauten der im Labormaßstab gefertigten Platten

Plattentyp-Nr.	Plattenaufbau		
	Oberlage	Mittellage	Unterlage
279	F	F	F
293	FH	F	F
280	FO	F	F
294	FH	F	FH
281	FO	F	FO
295	FH	FH	FH
282	FO	FO	FO
283	L	L	L
296	LH	L	L
284	LO	L	L
297	LH	L	LH
285	LO	L	LO
298	LH	LH	LH
286	LO	LO	LO
289	B	B	B
290	BH	B	B
291	BH	B	BH
292	BH	BH	BH



Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung einer horizontalen Doppellage mit Wasserfalle (rechter Bildausschnitt)

2.6.1 Bewertung der Freilandproben in Anlehnung an DIN EN 252 (1989)

Für die Beurteilung eines möglichen Pilzangriffs an den Proben im Freiland wurde die Bewertungsmethode in Anlehnung an DIN EN 252 (1989) angewandt. Zur Bestim-

mung des Befallsgrades wurde ein sogenannter Pick-Test (Nicholas 1973) mit einer spitzen Messerklinge durchgeführt. Als Kriterien für die Einstufung in eine fünfstufige Skala (Tabelle 7) dienen die Eindringtiefe des Messers und die Ausdehnung des Befalls. Für die Bewertung der untersuchten Freilandproben in GK 3 wurden die Beurteilungskriterien in Anlehnung an DIN EN 252 (1989) angewandt.

Tabelle 7: Bewertungskriterien für die Proben in Anlehnung an DIN EN 252 (1989)

Bewertung	Einstufung	Bewertungskriterium
0	kein Angriff	Keinerlei Veränderungen, mit Ausnahme von Verfärbungen ohne eine Erweichung des Holzes
1	leichter Angriff	Wahrnehmbare Veränderungen, die aber in ihrem Umfang und Lage oder Verteilung begrenzt sind. Veränderungen, die äußerlich durch einen Abbau erkennbar sind; Weichwerden des Holzes bis zu einer augenscheinlichen Tiefe von ca. 1 mm
2	mittlerer Angriff	Deutliche Veränderungen mäßigen Umfangs mit folgenden Erscheinungsbildern: Veränderungen in Form von Weichwerden des Holzes bis zu einer augenscheinlichen Tiefe von 2 bis 3 mm und einer Ausdehnung von mehr als 1 cm ² je Prüfkörper
3	starker Angriff	Starke Veränderungen: erheblicher Abbau des Holzes bis zu einer Tiefe von 3 bis 5 mm und einer Ausdehnung von mehr als 20 cm ² oder Weichwerden des Holzes bis zu einer größeren Tiefe (10 bis 15 mm) auf einem begrenzten Bereich mit einer Ausdehnung von mehr als 1 cm ²
4	Ausfall	Durchbrechen des Holzstabes bei einer 3-Punkt-Biegeprüfung mit 20% der mittleren Bruchlast von nicht abgebautem, unbehandeltem Kiefernholz

Für die Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit wird ein Dauerhaftigkeitswert x nach Gleichung 14 gemäß DIN EN 252 (1989) berechnet.

Gleichung 14: Dauerhaftigkeitswert x

$$\text{Dauerhaftigkeitswert } x = \frac{\text{Standzeit}_{\text{Prüfholz}}}{\text{Standzeit}_{\text{Referenzholz}}}$$

Tabelle 8: Klassifikation auf Basis von DIN EN 252 (1989)

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	Klassifikation auf Basis von EN 252
1	sehr dauerhaft	$x > 5$
2	dauerhaft	$3 < x \leq 5$
3	mäßig dauerhaft	$2 < x \leq 3$
4	wenig dauerhaft	$1,2 < x \leq 2$
5	nicht dauerhaft	$x \leq 1,2$

2.6.2 Prüfung mittels HEMI-Test

Vor der Bewitterung und nach 12 Monaten Bewitterung wurden $n=5$ Prüfkörper des Ausgangsmaterials für den HEMI-Test aus der Doppellage entnommen. Der HEMI-Test wurde wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben durchgeführt. Die ermittelte RIM wurde zur Einschätzung des Auftretens von Fäulnis herangezogen (*cf.* 2.5).

2.7 HEMI-Test von beschichteten Hölzern

Zur Untersuchung des Einflusses einer Beschichtung auf die RIM wurden HEMI-Tests mit axial zugeordneten und verschieden beschichteten Prüfkörpern durchgeführt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Parameter für Untersuchung zum Einfluss von Beschichtungen auf die RIM ($n=5$, für jedes Ausgangsmaterial wurden $n=5$ unbeschichtete Kontrollen geprüft)

Bezeichnung	Holzart	Beschichtung durch
D3	L	WKI
D3	LH	WKI
FW-11-2	L	WKI
FW-11-2	LH	WKI
FW-11-7	L	WKI
FW-11-7	LH	WKI
Remmers tief penetrierend	BH	Fa. Remmers

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Adaption und Kalibrierung der Prüfmethode

3.1.1 Optimierung der Kugelmischung

Die Versuche zur Optimierung der Kugelmischung zeigten für alle Kugelmischungen eine signifikante Korrelation der RIM mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (decrease in mass = dm) an Buchenholz (Abbildung 6).

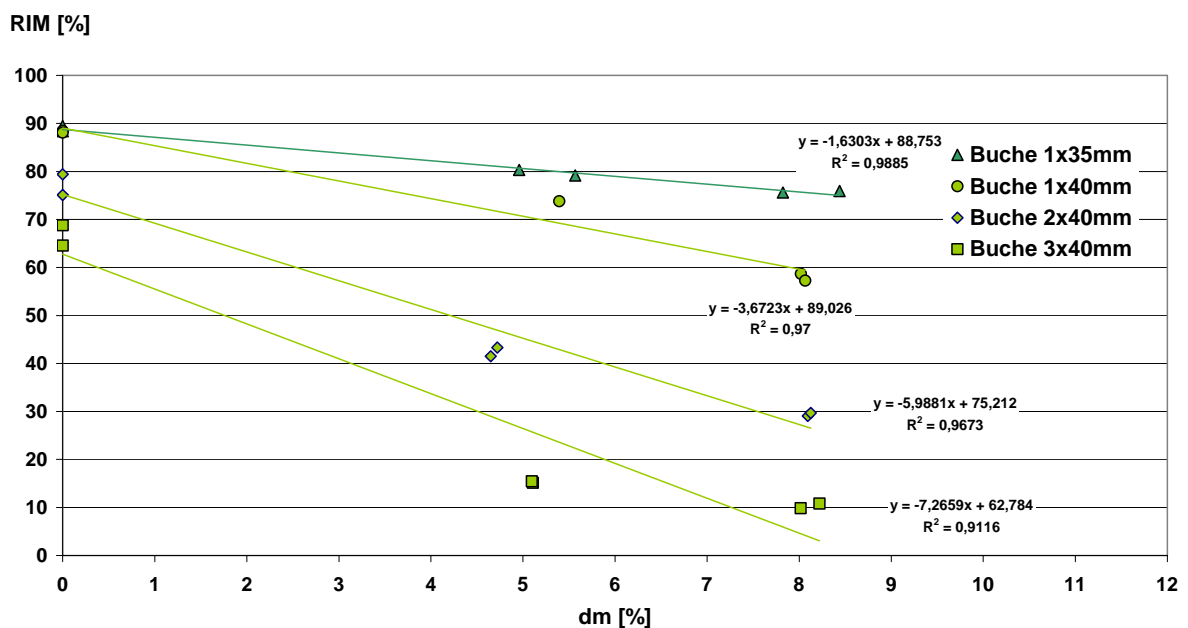


Abbildung 6: Korrelation der RIM unter Verwendung verschiedener Kugelmischungen mit der durch Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm) an Buche

Für die HEMI-Prüfung von Buchenholz wurde eine Kugelmischung mit 2 Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 40 mm ausgewählt ($RIM_{2x40, Buche}$), da in diesem Fall eine für die Trennung von Hitzebehandlungsintensitäten geeignete Steigung der Korrelationsgeraden von 5,9881 bei einem $R^2 = 0,9673$ erzielt wurde. Eine niedrigere Steigung der Korrelationsgeraden im Fall der Kugelmischung 1 x 35 mm und 1 x 40 mm verhindert eine zuverlässige Trennung von Behandlungsintensitäten ebenso wie ein geringes Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9116$ resultierend aus dem Einsatz von 3 Kugeln von 40 mm Durchmesser.

Eine signifikante Korrelation der RIM mit der durch Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm) resultierte auch aus der HEMI-Prüfung der Fichtenprüfkörper mit verschiedenen Kugelmischungen (Abbildung 7).

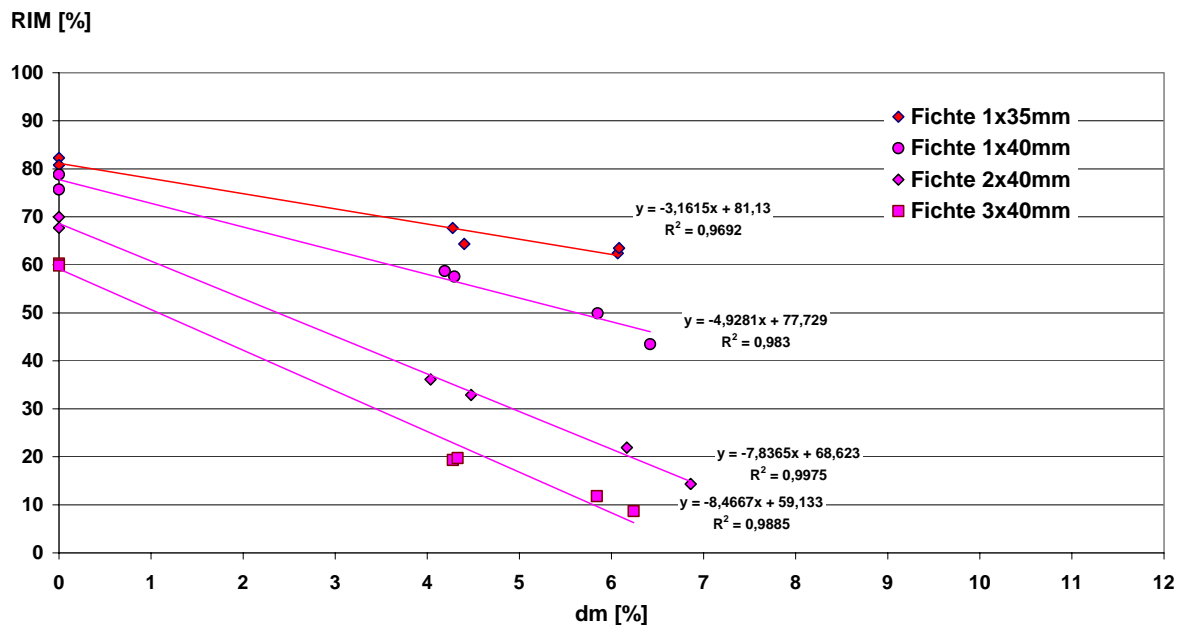


Abbildung 7: Korrelation der RIM unter Verwendung verschiedener Kugelmischungen mit der durch Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm) an Fichte

Für weitere HEMI-Prüfungen mit Fichte wurde die Kugelmischung (3 x 12 mm und 3 x 6 mm) und mit einer Stahlkugel mit einem Durchmesser von 40 mm ausgewählt (RIM_{1x40, Fichte}). Die Verwendung von 2 bzw. 3 Stahlkugeln von je 40 mm Durchmesser führte zwar zu einem stärkeren Anstieg der Geraden, damit verbunden aber auch zu einer höheren Beanspruchung des Fichtenmaterials, sodass eine Prüfung von hitzebehandeltem Fichtenmaterial mit einer dm > 8 % nicht möglich erscheint, da die RIM in diesem Fall durch Regression einen Wert von 0 % aufweist. Die Ergebnisse bezüglich der Kugelmischung für Fichtenholz wurden für die Kugelauswahl für Lärche übernommen (RIM_{1x40, Lärche}).

Auf Basis der Testergebnisse wurden folgende Kugelmischungen ausgewählt:

Fichte und Lärche	(RIM _{1x40, Fichte} ; RIM _{1x40, Lärche})	1 x 40 mm, 3 x 12 mm, 3 x 6 mm
Buche	(RIM _{2x40, Buche})	2 x 40 mm, 3 x 12 mm, 3 x 6 mm

3.1.2 Masseabnahme der Prüfkörper nach thermischer Vergütung

Nachfolgend sind die Mittelwerte der Masseabnahmen durch Hitzebehandlung der Prüfkörper zur Erstellung von Kalibrierkurven dargestellt (Abbildung 8). Es sind jeweils $n = 20$ Prüfkörper ($n = 10$ für HEMI, $n = 5$ für ASE und $n = 5$ für die Bestimmung des Kohlenhydratgehaltes) zusammengefasst in einem Datenpunkt dargestellt.

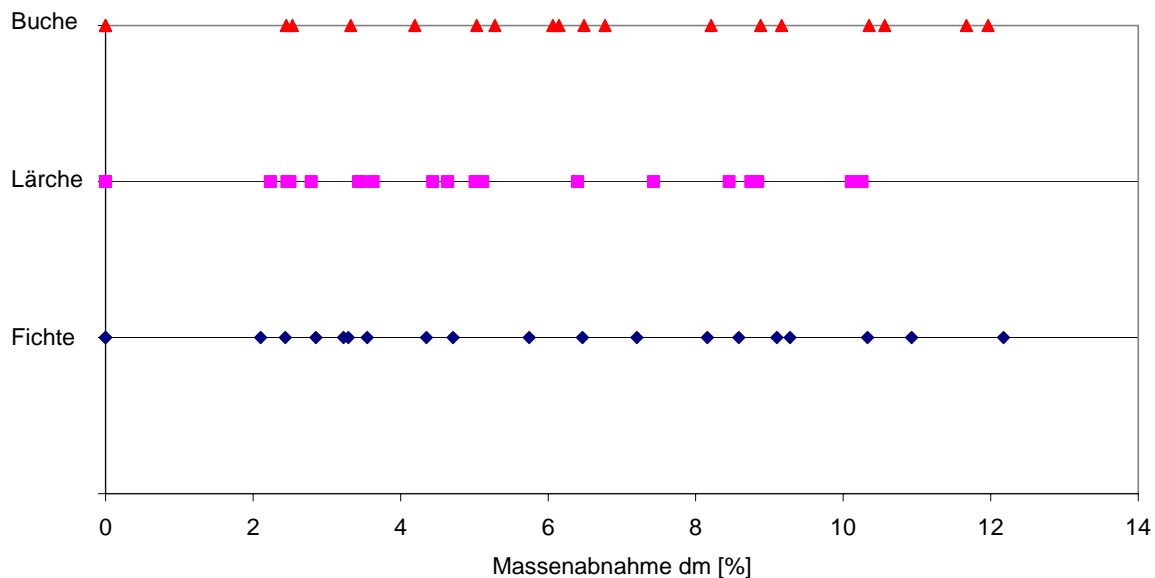


Abbildung 8: Mittlere Masseabnahme durch Hitzebehandlung von jeweils 20 Prüfkörpern je Datenpunkt der drei verwendeten Holzarten Lärche, Buche und Fichte für Versuche zur Kalibrierung der innovativen Prüfmethode

Für Prüfkörper aus Buche und Fichte wurden Masseabnahmen im Bereich von 2 bis 12 % erzielt, Prüfkörper aus Lärche wiesen Massenabnahmen zwischen 2 und 10 % auf.

3.1.3 Kalibrierung der Resistance to Impact Milling (RIM) für Lärche, Buche und Fichte

Die hitzebehandelten Prüfkörper aus Lärche, Buche und Fichte zeigten mit ansteigender Masseabnahme eine verringerte RIM (Abbildung 9 - 11).

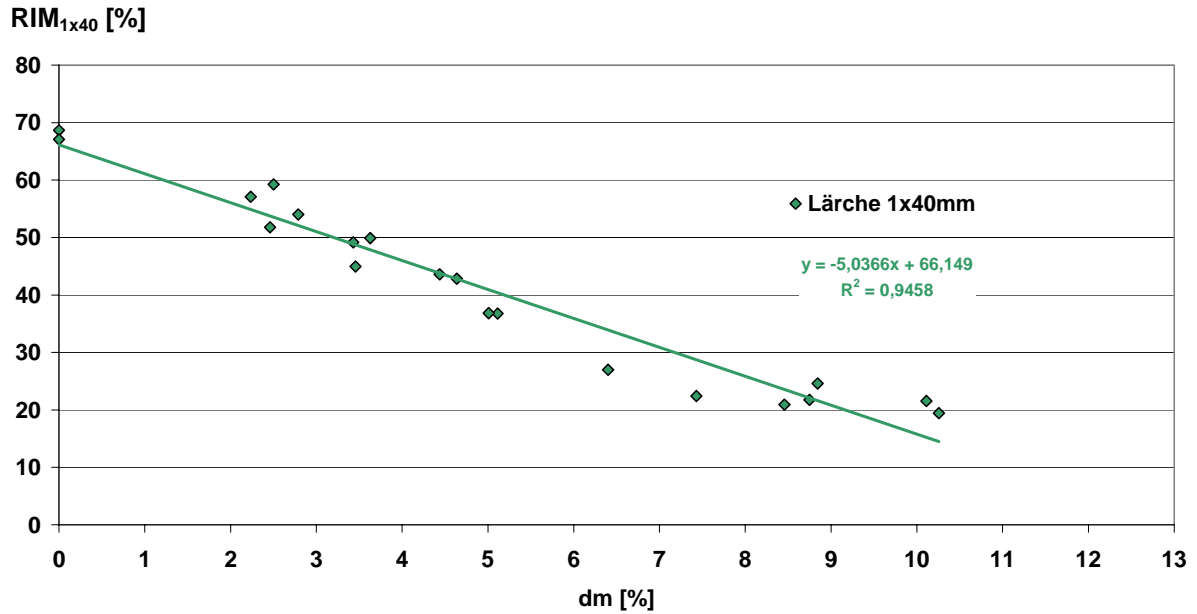


Abbildung 9: Korrelation zwischen RIM_{1x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Lärche, Kugelmischung: 1x40mm, 3x12mm, 3x6mm

Über den gesamten Bereich der erzeugten Masseabnahme (dm) zeigten die Lärchen-Prüfkörper eine signifikant reduzierte RIM_{1x40}, die linear mit der Behandlungsin- tensität korreliert (Abbildung 9).

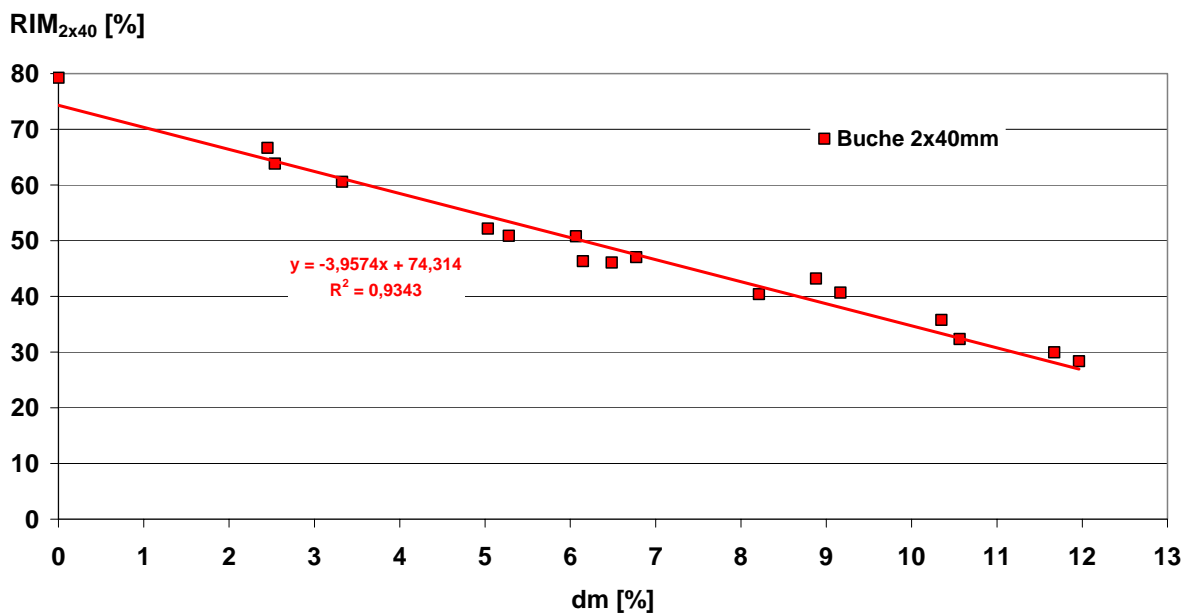


Abbildung 10: Korrelation zwischen RIM_{2x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Buche, Kugelmischung: 2x40mm, 3x12mm, 3x6mm

Die thermisch vergüteten Fichten- und Buchenproben wiesen ebenso eine lineare Korrelation von Masseabnahme und Abnahme der RIM auf (Abbildung 10 - 11).

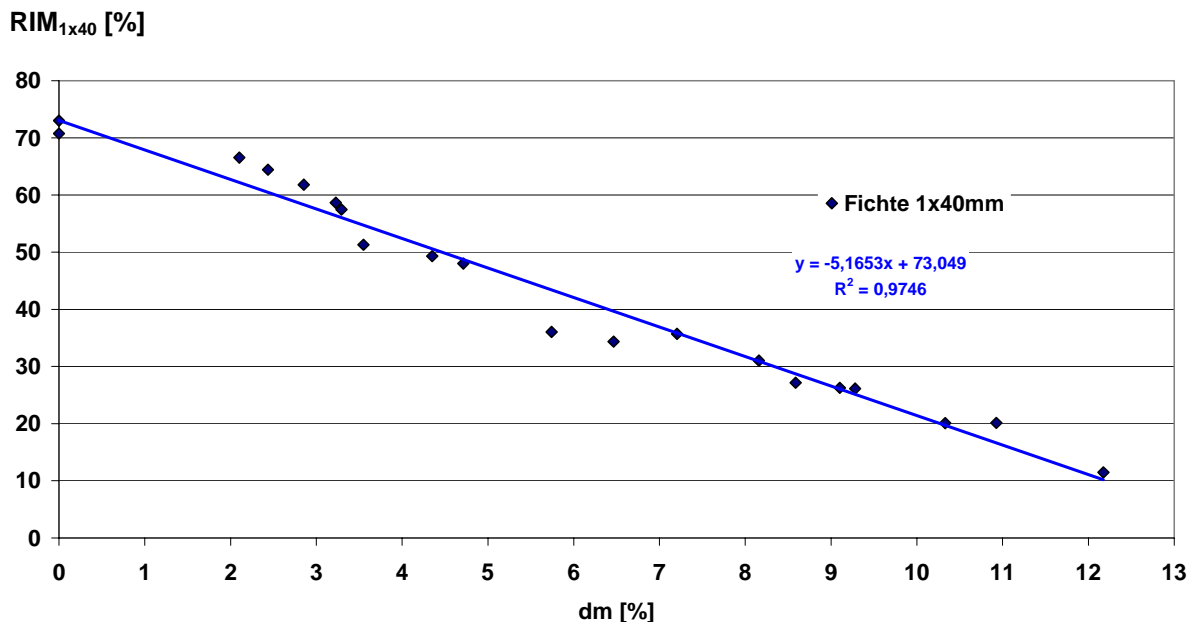


Abbildung 11: Korrelation zwischen RIM_{1x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Fichte, Kugelmischung: 1x40mm, 3x12mm, 3x6mm

Die Eignung des HEMI-Tests zur Charakterisierung der Vergütungsintensität wird aus Abbildung 9 -Abbildung 11 klar ersichtlich. So resultiert eine Masseabnahme durch Hitzebehandlung in kleineren RIM-Werten. Mit Hilfe der Korrelationsgeraden für Lärche, Buche und Fichte wurde der Vergütungsgrad des Ausgangsmaterials bestimmt.

3.1.4 Kalibrierung des Decay Indicator Value (DIV) für Lärche, Buche und Fichte

Die für die Holzart Fichte entwickelte Methode zur Bestimmung des Rest-Kohlenhydratgehaltes durch chemische Hydrolyse wurde hinsichtlich der Eignung für die Holzarten Lärche und Buche überprüft. Als Referenz wurden Fichtenprüfkörper verwendet. Nachfolgend sind die Ergebnisse dargestellt.

Eine zur Unterscheidung von Hitzevergütungsintensitäten geeignete Korrelation von Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) zu Gesamt-Kohlenhydraten (KH) wurde für die Prüfkörper aus Lärche nicht gefunden (Abbildung 12). Eine Einschätzung der

Vergütungsintensität auf Grundlage des ermittelten Rest-Kohlenhydratgehaltes ist somit für die Holzart Lärche nicht gewährleistet.

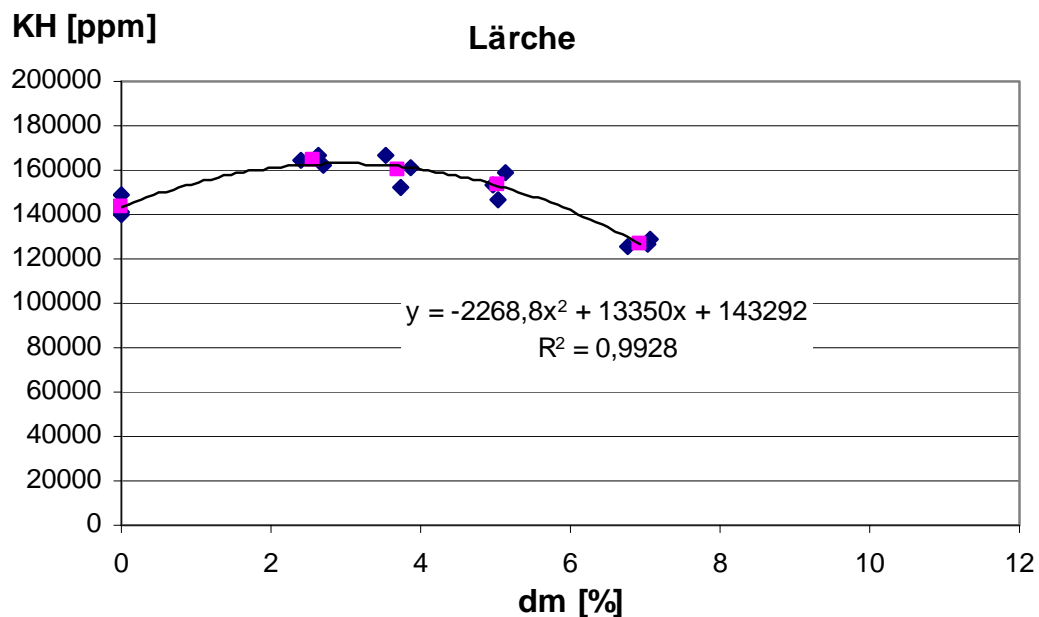


Abbildung 12: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Lärchenprüfkörpern in Abhängigkeit der Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung

Wie für Lärche, konnte für die thermisch modifizierten Buchenprüfkörper keine geeignete Korrelation von Behandlungsintensität und Masseabnahme (dm) zum Kohlenhydratgehalt (KH) ermittelt werden (Abbildung 13).

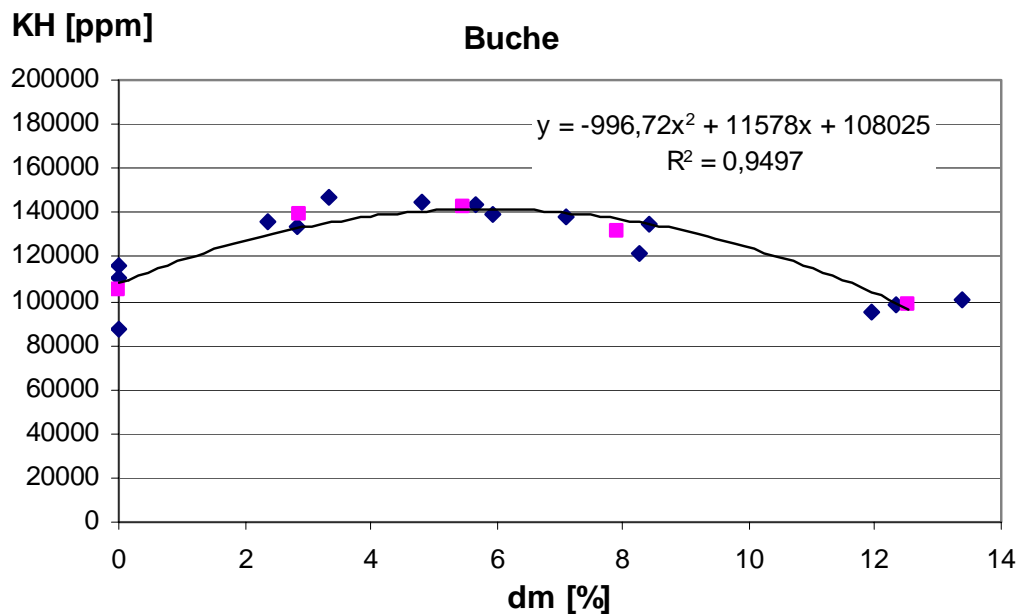


Abbildung 13: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Buchenprüfkörpern in Abhängigkeit des Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung

Eine Unterscheidung von Vergütungsintensitäten mittels Bestimmung des DIV erscheint somit für Buche und Lärche nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Bestimmung des DIV für die Qualitätseinschätzung der Vergütung von Buche und Lärche nicht eingesetzt. Im Gegensatz hierzu wiesen die mit verschiedenen Intensitäten thermisch vergüteten Fichtenproben über den gesamten dm-Bereich eine lineare Abhängigkeit zum ermittelten Kohlenhydratgehalt (KH) auf (Abbildung 14).

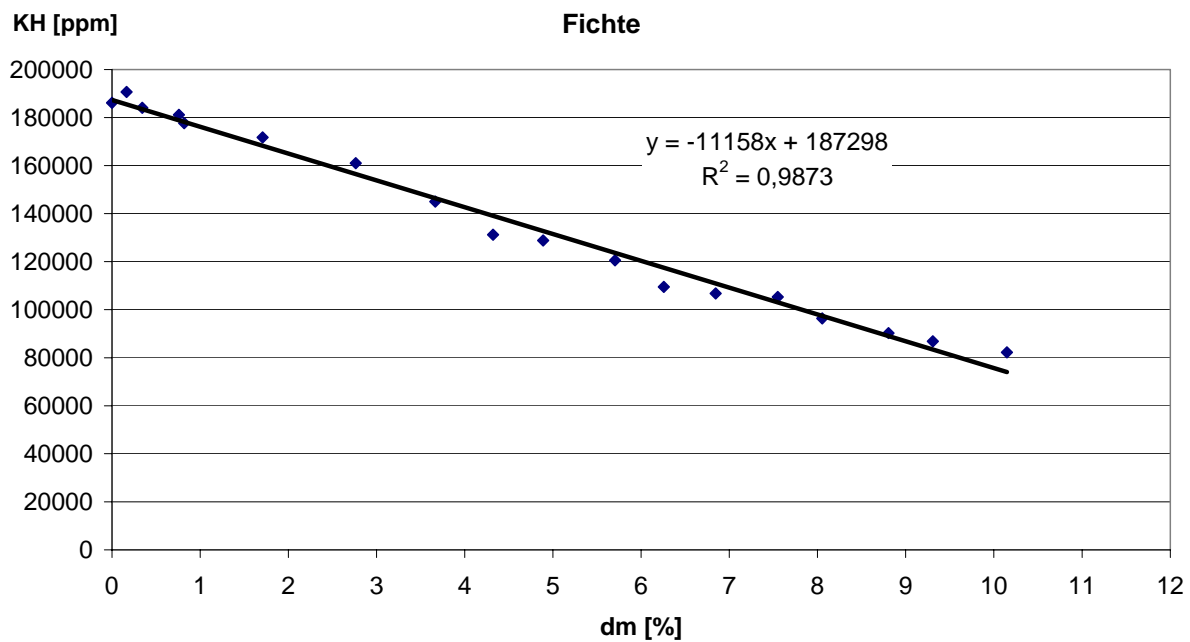


Abbildung 14: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Fichtenprüfkörpern in Abhängigkeit der Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung

3.1.5 Kalibrierung der Farbwertbestimmung

Die beste Korrelation von Farbwertänderung und Massenabnahme durch Hitzebehandlung ergab sich für den kumulierten Farbwert L^*+b^* (Abbildung 15). Für alle drei Holzarten wurde mit zunehmender Massenabnahme eine annähernd lineare Abnahme von L^*+b^* ermittelt.

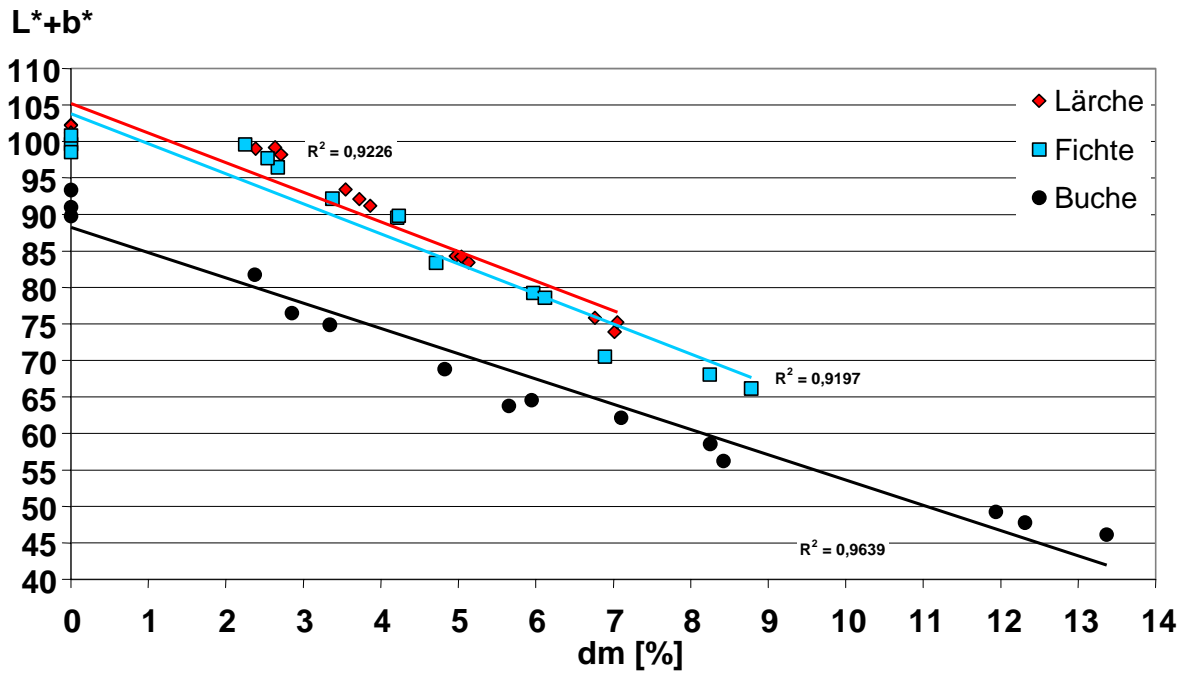


Abbildung 15: Die Änderung des kumulierten Farbwertes L*+b* durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme

3.1.6 Kalibrierung der Methode zur Bestimmung der Quellungsvergütung

Die Untersuchungen zur Quellungsvergütung von Buchen-Prüfkörpern nach Hitzebehandlung zeigen eine signifikante Korrelation: Mit steigender Masseabnahme erhöhte sich die Dimensionsstabilisierung exponentiell (Abbildung 16).

Buche ASE [%]

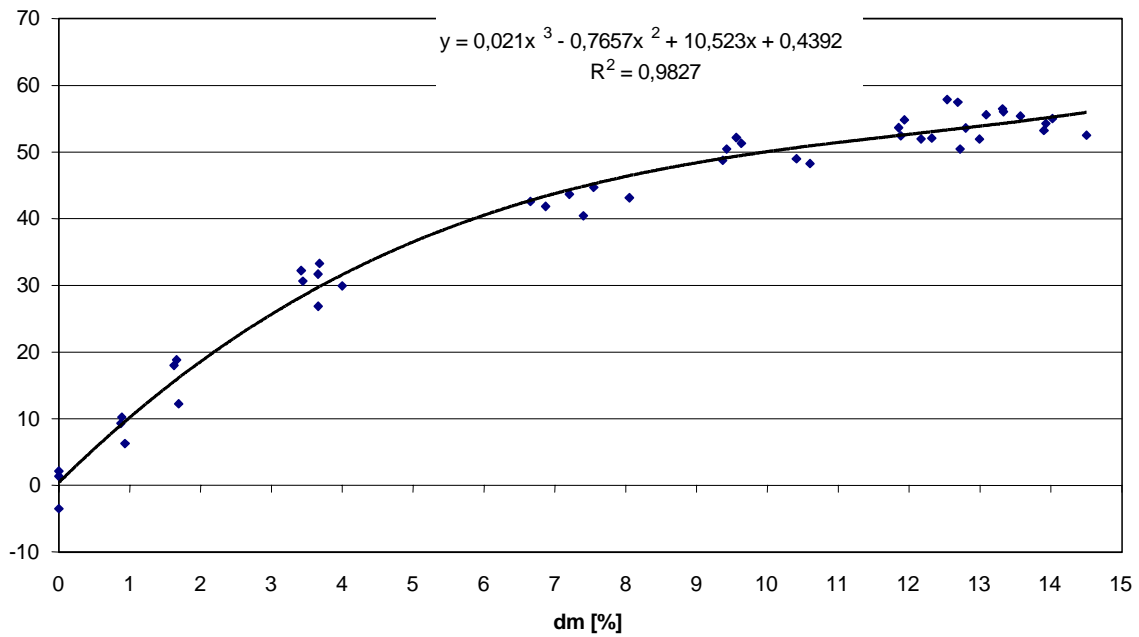


Abbildung 16: Quellungsvergütung (ASE) der Buchenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm)

Eine Hitzebehandlung der Lärchenprüfkörper führte zu einer verbesserten Quellungsvergütung bei gleichzeitiger Masseabnahme (Abbildung 17).

Lärche ASE [%]

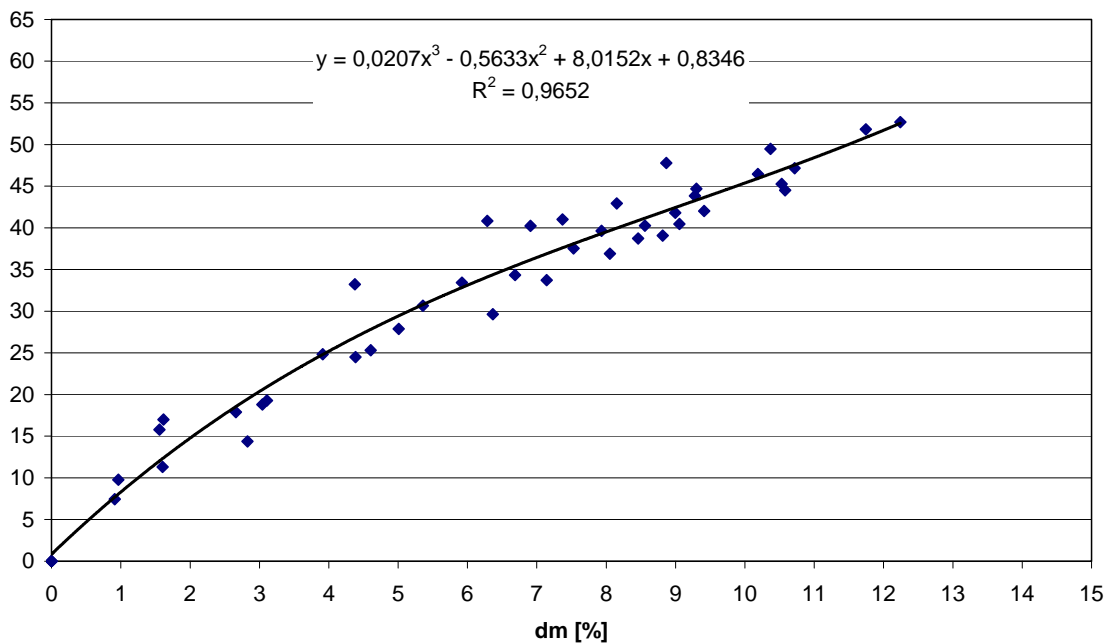


Abbildung 17: Quellungsvergütung (ASE) der Lärchenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachtem Masseabnahme (dm)

Auch für Fichte wurde eine derartige Abhängigkeit gefunden (Abbildung 18).

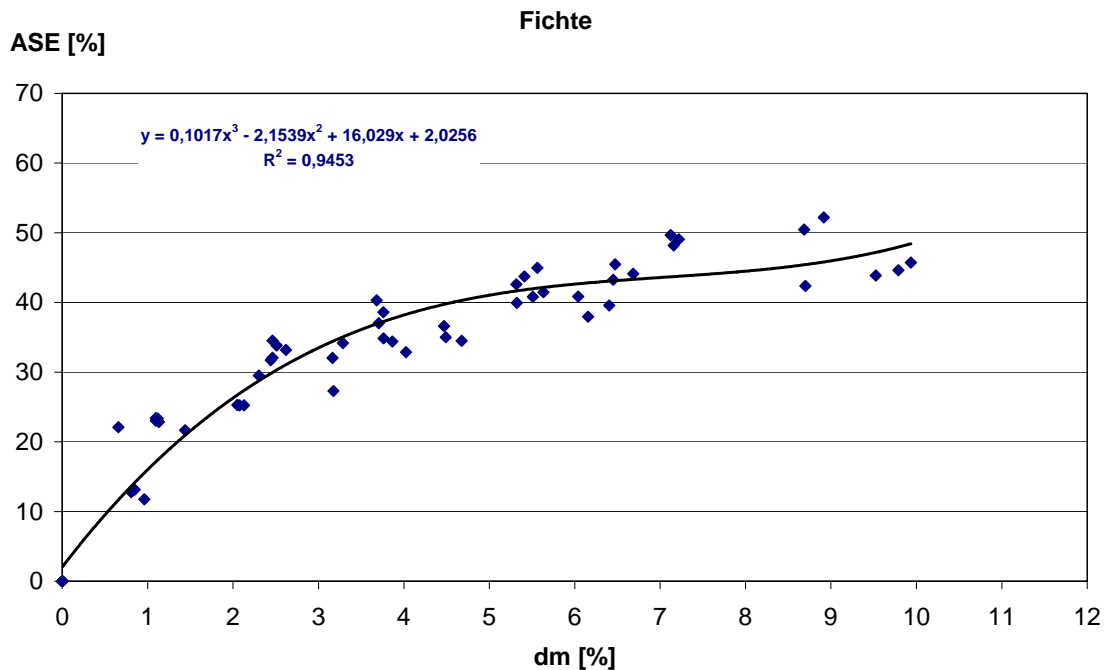


Abbildung 18: Quellungsvergütung (ASE) der Fichtenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm)

Die Korrelationskurven für Lärche, Buche, und Fichte wurden zur Einschätzung der Vergütungsqualität des Ausgangsmaterials mittels Bestimmung der Quellungsreduktion herangezogen.

3.2 Qualitätsprüfung des Ausgangsmaterials für die Plattenherstellung

3.2.1 Resistance to Impact Milling (RIM)

Die Ergebnisse der HEMI-Prüfung des Ausgangsmaterials für die Plattenherstellung sind in Abbildung 19 dargestellt. Für unbehandelte Buche wurde eine mittlere $RIM_{2 \times 40}$ von 68,5 % ermittelt. Dagegen betrug die $RIM_{2 \times 40}$ der Buche HT im Mittel nur 38,5 %.

Für die unbehandelten Lärchen-Prüfkörper wurde eine mittlere $RIM_{1 \times 40}$ von 66,4 %, für Lärche HT von 38,1 % und für Lärche OHT eine mittlere $RIM_{1 \times 40}$ von 14,8 % ermittelt. Im Vergleich mit unbehauelter Fichte (75,4 %) war die $RIM_{1 \times 40}$ der thermisch vergüteten Fichte mit 61 % (FH) bzw. 53 % (FO) weniger stark reduziert.

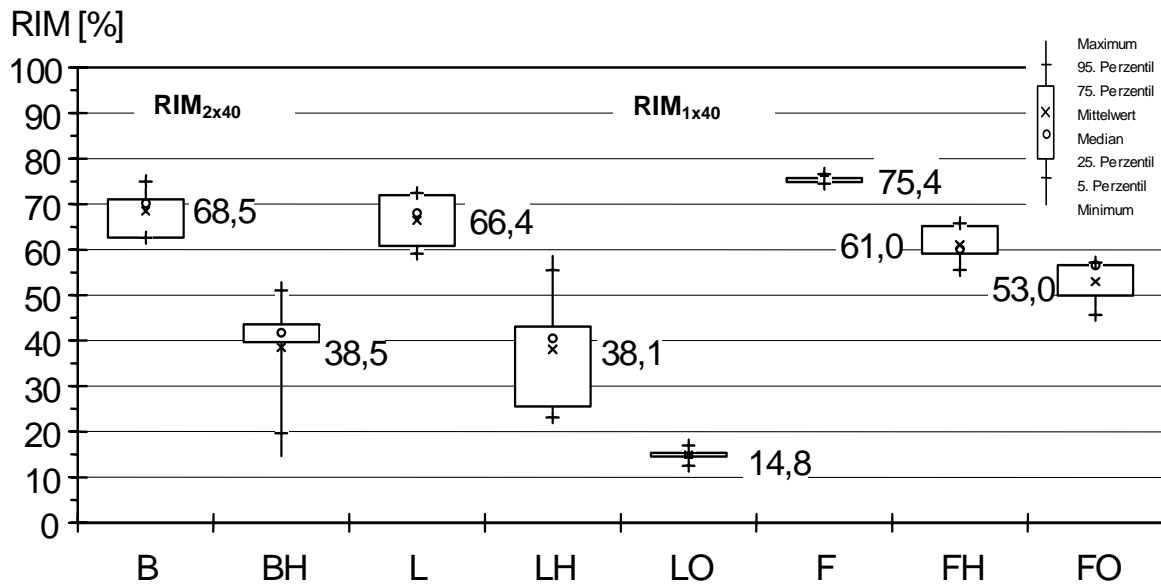


Abbildung 19: RIM der verschiedenen Ausgangsmaterialien für die Plattenherstellung; n=5

Unter Verwendung der Kalibrierfunktionen (3.1.3) und der ermittelten RIM-Werte (Abbildung 19) erfolgte die Einschätzung der Vergütungsintensität des gelieferten Ausgangsmaterials für die Fassadenplattenherstellung.

$$\text{RIM}_{2x40, \text{Buche}} = -3,9574 * \text{dm}_{\text{Buche}} + 74,314$$

$$\text{dm}_{\text{Buche}} = (\text{RIM}_{2x40, \text{Buche}} - 74,314) / -3,9574 \text{ [%]}$$

$$\text{RIM}_{1x40, \text{Fichte}} = -5,1563 * \text{dm}_{\text{Fichte}} + 73,049$$

$$\text{dm}_{\text{Fichte}} = (\text{RIM}_{1x40, \text{Fichte}} - 73,049) / -5,1563 \text{ [%]}$$

$$\text{RIM}_{1x40, \text{Lärche}} = -5,0366 * \text{dm}_{\text{Lärche}} + 66,149$$

$$\text{dm}_{\text{Lärche}} = (\text{RIM}_{1x40, \text{Lärche}} - 66,149) / -5,0366 \text{ [%]}$$

Die errechneten Massenabnahmen als Maß der Vergütungsintensität sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten RIM-Werten

ID	Holzart	Behandlung	RIM - ermittelt	dm - berechnet
F	Fichte	unbehandelt	75,4 %	0 %
FO		hitzebehandelt - OHT	53,0 %	3,9 %
FH		hitzebehandelt - PLATO	61,0 %	2,3 %
L	Lärche	unbehandelt	66,4 %	0 %
LO		hitzebehandelt - OHT	14,8 %	10,2 %
LH		hitzebehandelt - PLATO	38,1 %	5,6 %
B	Buche	unbehandelt	68,5 %	0 %
BH		hitzebehandelt - MIRAKO	38,5 %	9,0 %

3.2.2 Decay Indicator Value (DIV)

Auf Grund der Ergebnisse der Versuche zur Erstellung von Korrelationsfunktionen des Kohlenhydratgehaltes mit dem Masseabnahme durch Hitzebehandlung wurde die Bestimmung des DIV für eine Einschätzung der Vergütungsintensität nicht herangezogen.

3.2.3 L*a*b* - Farbwerte

Die kumulierten Farbwerte L*+b* des Ausgangsmaterials (Abbildung 20) wurden zur Einschätzung der Vergütungsintensität entsprechend der ermittelten Kalibrierfunktionen (3.1.5) herangezogen.

$$L^*+b^*_{\text{Lärche}} = -4,0553 \cdot dm_{\text{Lärche}} + 105,2$$

$$dm_{\text{Lärche}} = (L^*+b^*_{\text{Lärche}} - 105,2) / -4,0553 \text{ [%]}$$

$$L^*+b^*_{\text{Fichte}} = -4,1191 \cdot dm_{\text{Fichte}} + 103,83$$

$$dm_{\text{Fichte}} = (L^*+b^*_{\text{Fichte}} - 103,83) / -4,1191 \text{ [%]}$$

$$L^*+b^*_{\text{Buche}} = -3,4621 \cdot dm_{\text{Buche}} + 88,237$$

$$dm_{\text{Buche}} = (L^*+b^*_{\text{Buche}} - 88,237) / -3,4621 \text{ [%]}$$

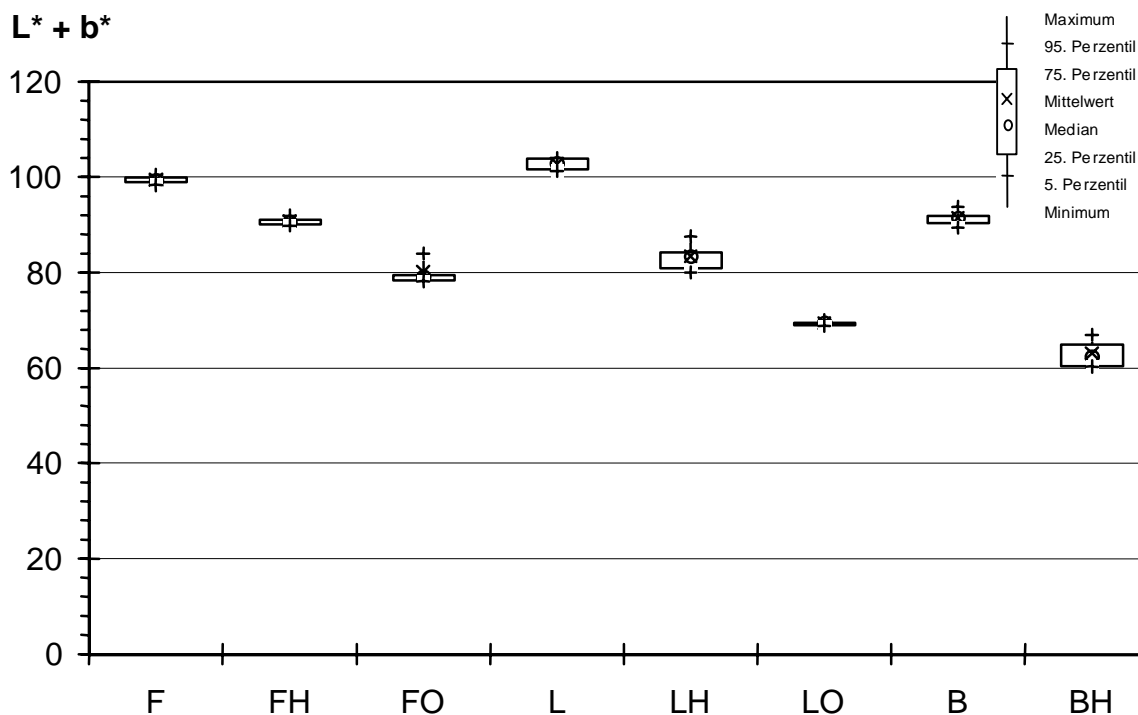


Abbildung 20: Kumulierter Farbwert L*+b* der verschiedenen Ausgangsmaterialien

Die errechneten Massenabnahmen als Maß der Vergütungsintensität sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten L*+b*-Werten

ID	Holzart	Behandlung	L*+b* - ermittelt	dm - berechnet
F	Fichte	unbehandelt	99	0%
FO		hitzebehandelt - OHT	80	4%
FH		hitzebehandelt - PLATO	91	2%
L	Lärche	unbehandelt	103	0%
LO		hitzebehandelt - OHT	70	8%
LH		hitzebehandelt - PLATO	83	5,5%
B	Buche	unbehandelt	92	0%
BH		hitzebehandelt - MIRAKO	63	7%

3.2.4 Dauerhaftigkeit nach DIN EN 113 (1996)

Von den zur Prüfung eingesetzten Standardprüfpilzen verursachte der Prüfpilz *Poria placenta* den stärksten Masseverlust an thermisch modifizierten Material. Die unbehandelten Nadelhölzer Fichte und Lärche wiesen einen mittleren Masseverlust von

ca. 30% auf, während für unbehandelte Buche ein mittlerer Masseverlust von ca. 18% bestimmt wurde (Abbildung 21). Den stärksten Masseverlust aller hitzebehandelten Hölzer wies Fichte HT (30%) auf, gefolgt von Lärche HT (15%) und Fichte OHT, Lärche OHT sowie Buche HT (alle im Bereich von ca. 0 bis 6 %).

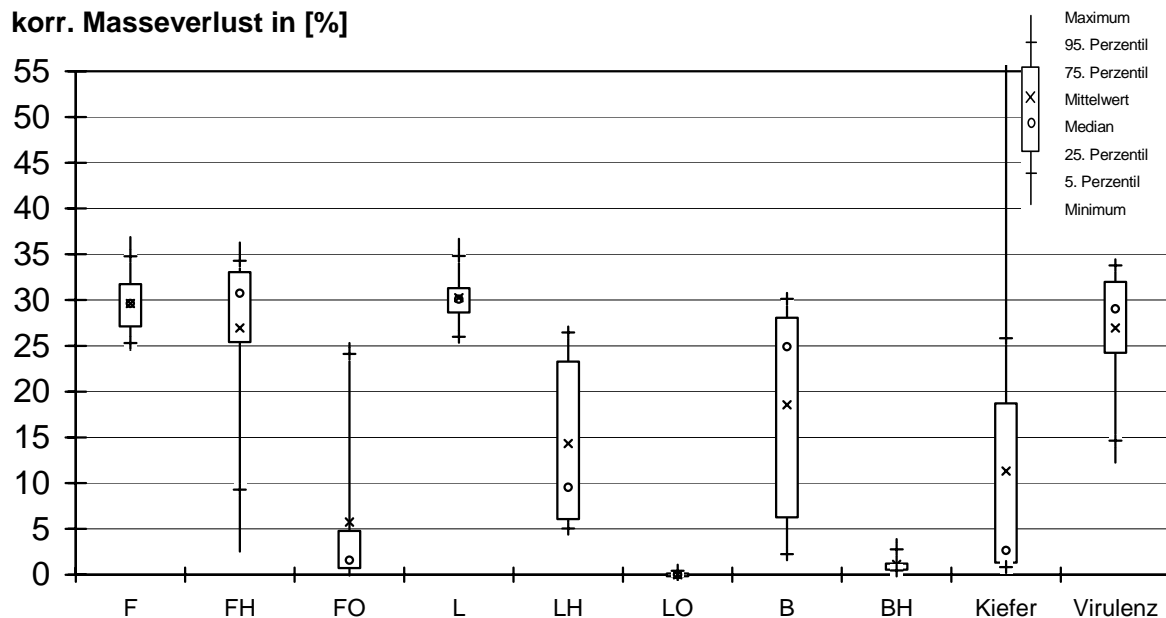


Abbildung 21: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen *Poria placenta*; Inkubationszeit: 8 Wochen

Der Weißfäuleerreger *Coriolus versicolor* bewirkte an un behandelter Buche im Mittel einen Masseverlust von 35%. Demgegenüber wurde für Fichte und Lärche ein Masseverlust von ca. 15% ermittelt (Abbildung 22). Unter den thermisch modifizierten Materialien wurde der stärkste Masseverlust bei Buche HT (10%) bestimmt, gefolgt von Fichte HT (ca. 6%). Lärche HT, Lärche OHT und Fichte OHT zeigten hingegen nur geringe Masseverluste zwischen 1 und 3%.

Die Prüfung mit dem Braunfäuleerreger *Coniophora puteana* erbrachte hohe Masseverluste für un behandelte Buche, Fichte und Lärche (35 bis 45%). Die Masseverluste an den thermisch modifizierten Materialien waren im Vergleich zu *Poria placenta* deutlich geringer, wobei Fichte HT mit ca. 6% den höchsten Masseverlust aufwies (Abbildung 23).

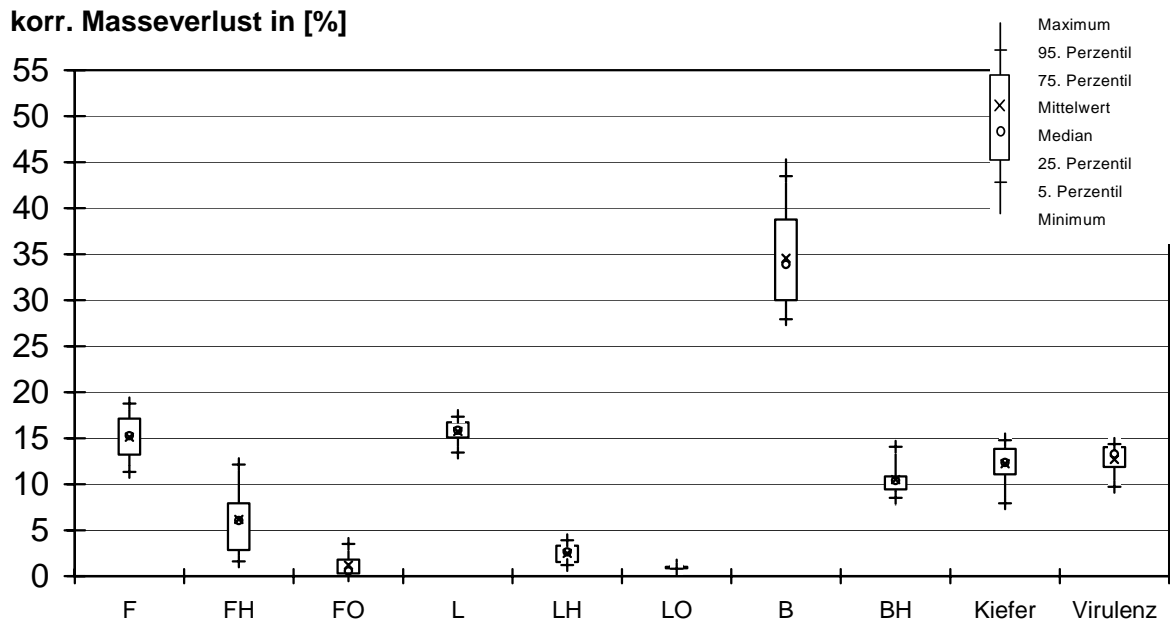


Abbildung 22: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen *Coriolus versicolor*; Inkubationszeit: 8 Wochen

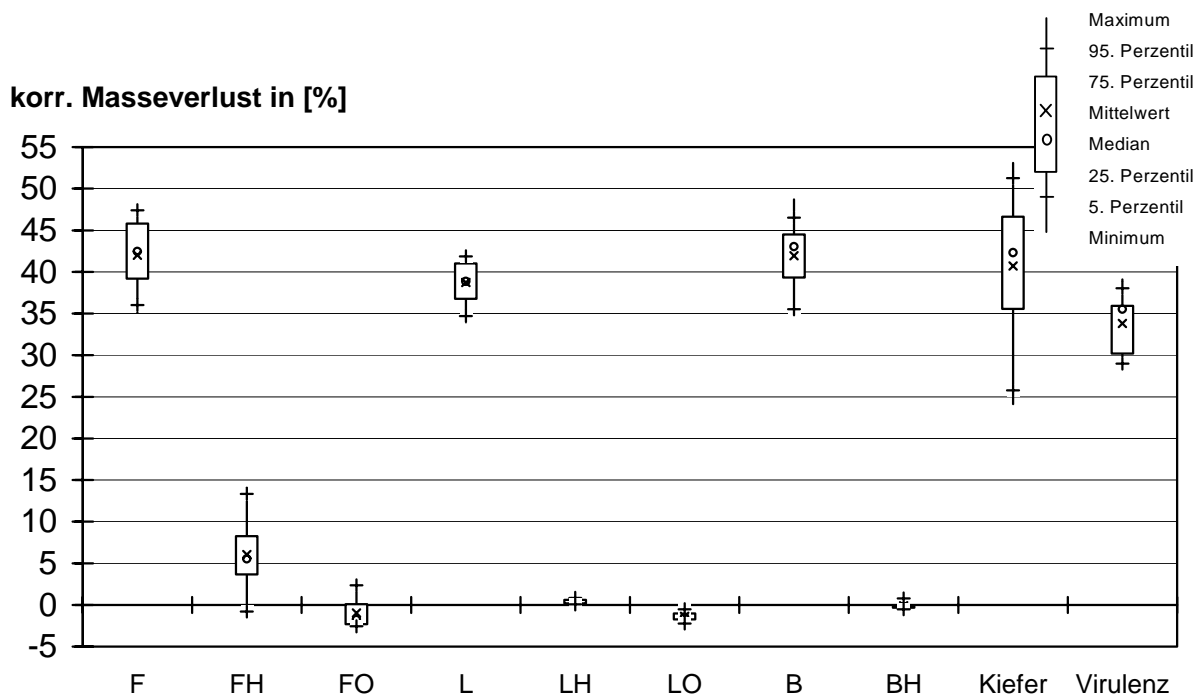


Abbildung 23: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen *Coniophora puteana*; Inkubationszeit: 8 Wochen

Die von den Prüfpilzen verursachten Masseverluste wurden zur Berechnung von Dauerhaftigkeitswerten (x-Wert, DIN EN 350-1, 1994) und zur Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen verwendet (Tabelle 12).

Tabelle 12: Einstufung der verschiedenen Materialien in Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit (DKL) nach DIN EN 350-1 (1994) basierend auf den Ergebnissen nach 8 Wochen Pilzangriff durch *Poria placenta* und *Coriolus versicolor* in Anlehnung an DIN EN 113 (1996)

Material	DKL bezogen auf den x-Wert		
	<i>Poria placenta</i>	<i>Coriolus versicolor</i>	<i>Coniophora puteana</i>
F	5	5	5
FH	5	3	1
FO	3	1	1
L	5	5	5
LH	5	2	1
LO	1	1	1
B	5	5	5
BH	1	4	1
Kiefer	5	5	5

Es wurde jeweils der für den stärksten Masseverlust verantwortliche Prüfpilz zur Dauerhaftigkeitseinschätzung herangezogen (*Coriolus versicolor* für Buche, *Poria placenta* für Fichte und Lärche). Unter den thermisch modifizierten Hölzern wurde Lärche OHT als "sehr dauerhaft", Fichte OHT als "mäßig dauerhaft" und Buche HT als "wenig dauerhaft" eingestuft; alle anderen Materialien waren "nicht dauerhaft".

3.2.5 Anti Swelling Efficiency (ASE)

Die Untersuchung der maximalen Quellung zeigte für alle hitzebehandelten Materialien eine signifikant reduzierte Dimensionsänderung (Abbildung 24).

Die Mittelwerte der gemittelten maximalen Quellung wurden zur Berechnung der Anti Swelling Efficiency (ASE) herangezogen.

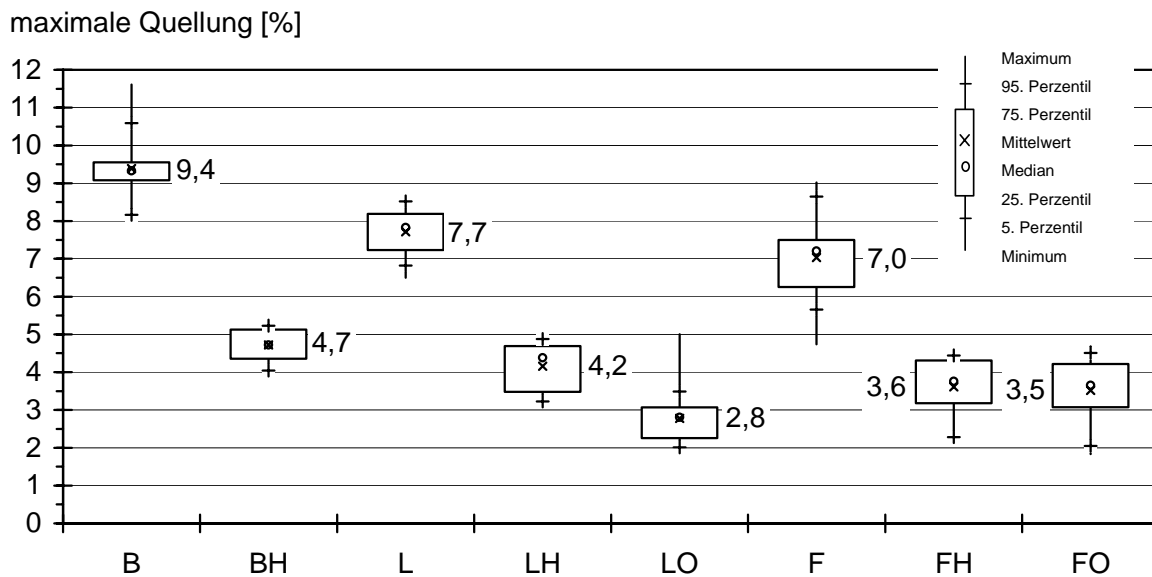


Abbildung 24: Quellung der verschiedenen Ausgangsmaterialien; n = 20

Die verschiedenen industriell hitzebehandelten Materialien zeigten eine signifikant verringerte Quellung (Abbildung 25). Die Öl-Hitze vergütete Lärche wies eine Quellungsvergütung von ca. 64 % auf, während die anderen thermisch modifizierten Materialien eine untereinander nicht-signifikant abweichende mittlere Quellungsvergütung im Bereich von ca. 46 bis 50 % zeigten.

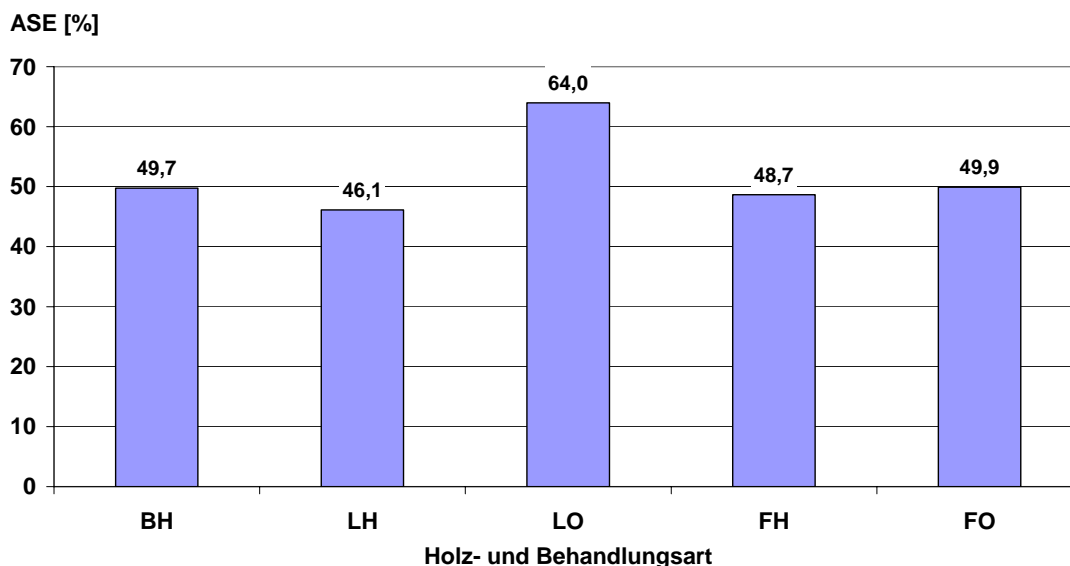


Abbildung 25: Dimensionsstabilisierung durch Hitzebehandlung im Vergleich zu unbehandelten Prüfkörpern ausgedrückt als ASE (Anti Swelling Efficiency); n = 20

Die ASE-Werte wurden zur Berechnung der theoretischen Massenabnahme durch Hitzebehandlung (dm) als ein Maß der Vergütungsintensität unter Verwendung der materialspezifischen Korrelationsfunktionen (c.f. 3.1.6) verwendet.

$$ASE_{\text{Fichte}} = 0,1017 * dm_{\text{Fichte}}^3 - 2,1539 * dm_{\text{Fichte}}^2 + 16,029 * dm_{\text{Fichte}} + 2,0256$$

$$dm_{\text{Fichte}} = - 0,00002 * ASE_{\text{Fichte}}^3 + 0,0059 * ASE_{\text{Fichte}}^2 - 0,0639 * ASE_{\text{Fichte}} + 0,0735$$

$$ASE_{\text{Lärche}} = 0,0207 * dm_{\text{Lärche}}^3 - 0,5633 * dm_{\text{Lärche}}^2 + 8,0152 * dm_{\text{Lärche}} + 0,8346$$

$$dm_{\text{Lärche}} = - 0,00002 * ASE_{\text{Lärche}}^3 + 0,0036 * ASE_{\text{Lärche}}^2 + 0,0925 * ASE_{\text{Lärche}} - 0,0172$$

$$ASE_{\text{Buche}} = 0,021 * dm_{\text{Buche}}^3 - 0,7657 * dm_{\text{Buche}}^2 + 10,523 * dm_{\text{Buche}} + 0,4392$$

$$dm_{\text{Buche}} = 0,00002 * ASE_{\text{Buche}}^3 + 0,0027 * ASE_{\text{Buche}}^2 + 0,0141 * ASE_{\text{Buche}} + 0,2696$$

Die durch Interpolation erfolgte Einschätzung der theoretischen Massenabnahme der industriell hergestellten hitzebehandelten Materialien sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Einschätzung der Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten ASE-Werten

ID	Holzart	Behandlung	ASE - ermittelt	dm - interpoliert
FO	Fichte	hitzebehandelt - OHT	49,9 %	8,9 %
FH		hitzebehandelt - PLATO	48,7 %	8,1 %
LO	Lärche	hitzebehandelt - OHT	64,0 %	15,3 %
LH		hitzebehandelt - PLATO	46,1 %	9,9 %
BH	Buche	hitzebehandelt - MIRAKO	49,7 %	10,4 %

3.3 Vergütungsqualität zusätzlich hergestellten Ausgangsmaterials

Die Vergütungsqualität der nachgelieferten Buche (BH) wies eine geringfügig höhere Vergütungsintensität, die Lärche (LO) eine geringfügig niedrigere Vergütungsintensität im Vergleich zum ursprünglich hergestellten Ausgangsmaterial auf (Abbildung 26).

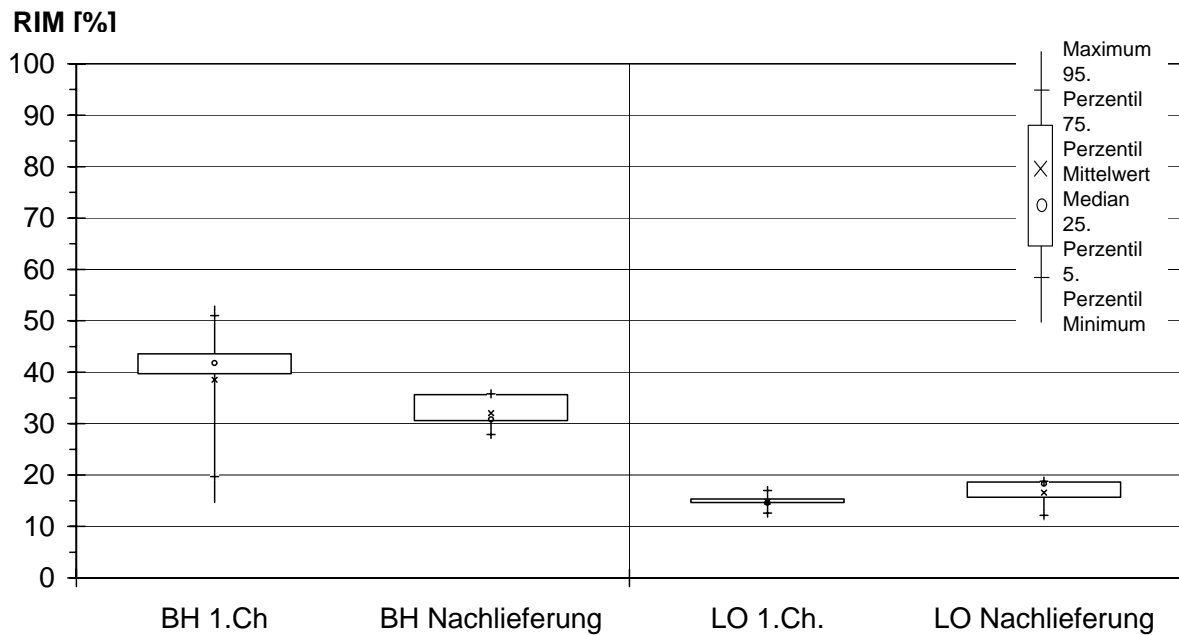


Abbildung 26: Resistance to Impact Milling (RIM) von zusätzlich (Nachlieferung) und ursprünglich (1.Charge) hergestelltem Ausgangsmaterial

3.4 Kalibrierreihen zur Fäulniserkennung (HEMI-Test)

Die HEMI-Prüfungen von verschiedenen stark abgebauten Prüfkörpern zeigten eine sehr gute Korrelation von Masseverlust (MV) durch Braunfäule mit RIM für alle Holzarten (Abbildung 27 - Abbildung 29).

Im Gegensatz hierzu ergab sich für Weißfäule lediglich für Buche eine starke Korrelation zwischen MV und RIM. Für alle drei Holzarten waren die Steigungen der Korrelationskurven geringer. Eine Fäulnisfrüherkennung (< 5% MV) erscheint für die praxisrelevante Braunfäule an Fichte und Lärche möglich, für Weißfäule nur an Buche. Jedoch sind hierzu weitere Untersuchungen im Bereich von 3-6% MV notwendig.

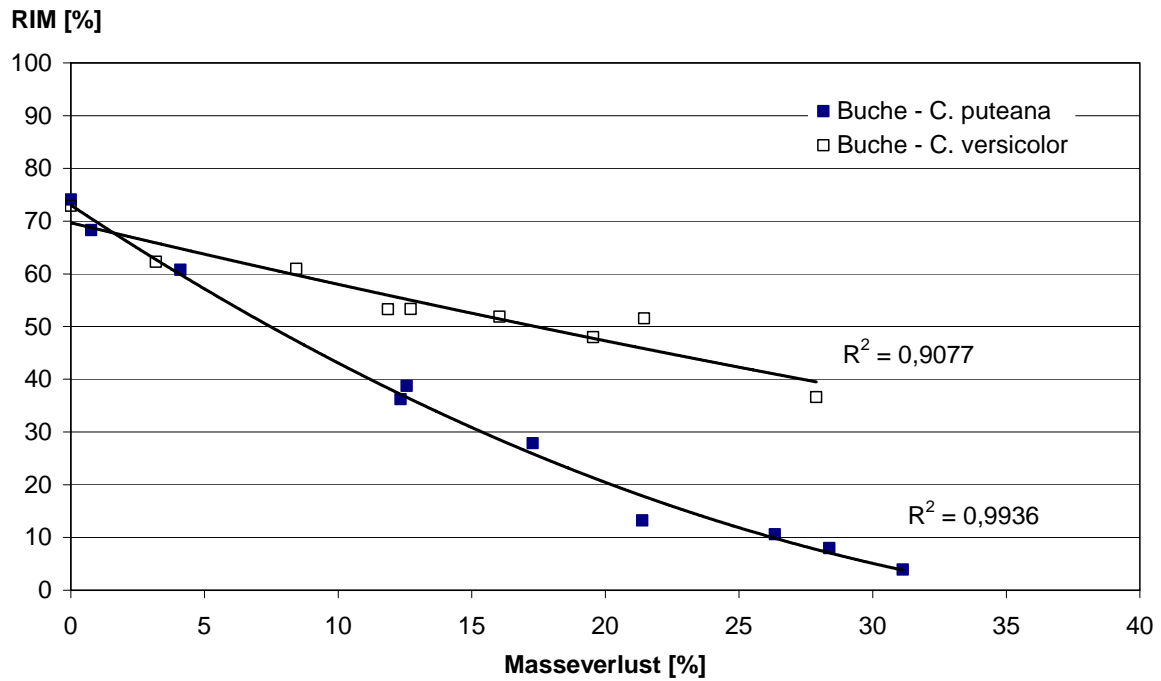


Abbildung 27: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Buche

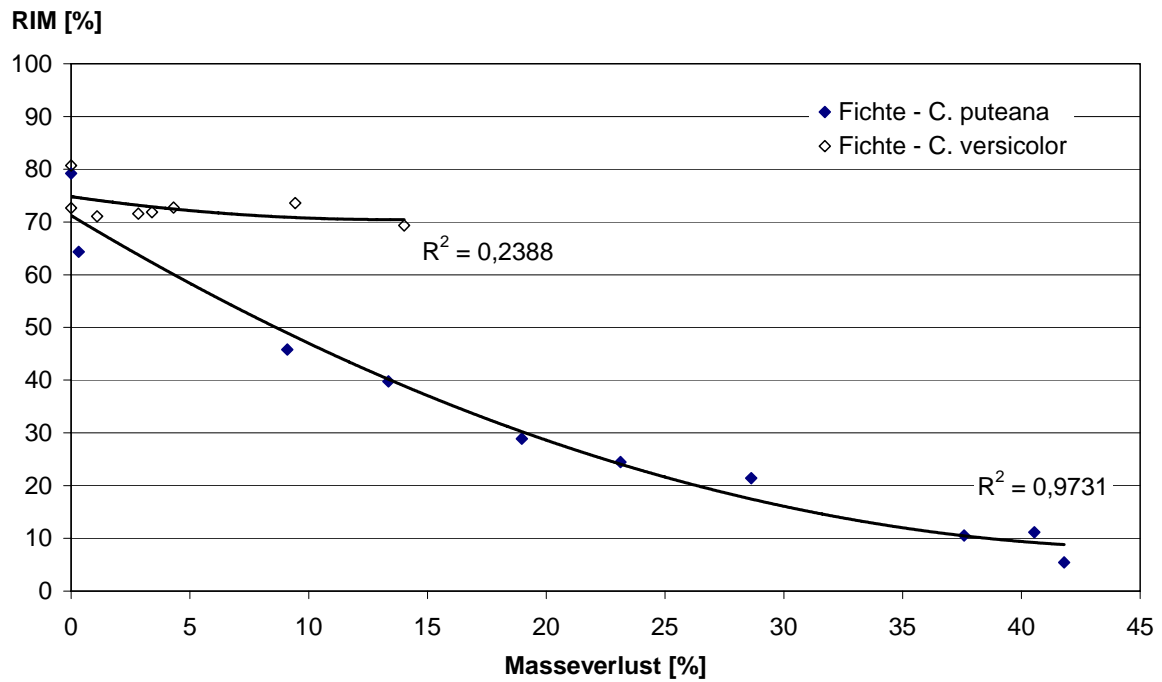


Abbildung 28: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Fichte

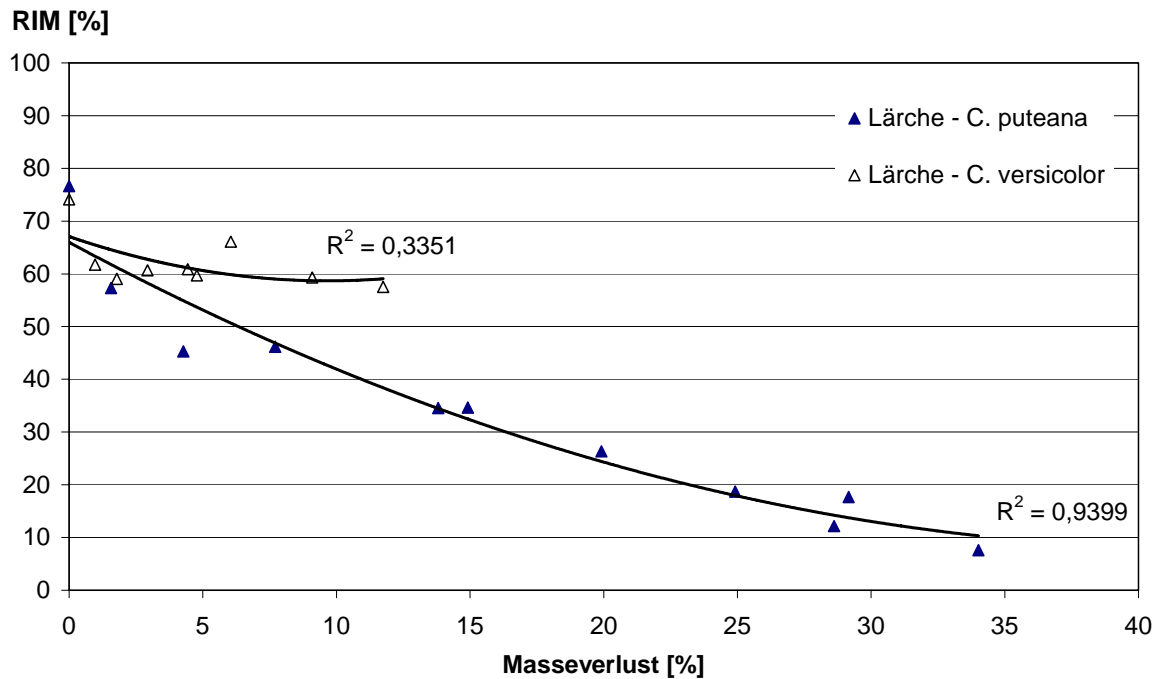


Abbildung 29: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Lärche

3.5 Fäulnisbewertung nach 24-monatiger Bewitterung im Freiland

Nach 24-monatiger Bewitterung in der Doppellage traten bei allen Prüfkörpern Verfärbungen auf (Abbildung 30 und Abbildung 31). Vorwiegend in der Oberlage kam es bei modifizierten Plattentypen zu leichten Delaminierungen. Bei vielen Prüfkörpern, unabhängig von der Holzart, Plattenart und Lage, wurde Pilzmycel an der Oberfläche festgestellt. Im Auflagerbereich von Plattentyp-Nr.298 und -Nr.290 konnten sogar Fruchtkörper gefunden werden (Abbildung 32). Jedoch ergab die Bewertung mittels Pick-Test (DIN EN 252, 1996) in der Regel eine „0“. Lediglich der Plattentyp-Nr.280 wurde im Auflagerbereich mit 1 bewertet, wobei die Schädigung anscheinend durch Moderfäule hervorgerufen wurde.



Abbildung 30: Oberlage der Laborplatten nach 24-monatiger Freibewitterung



Abbildung 31: Unterlage der Laborplatten nach 24-monatiger Freibewitterung



Abbildung 32: Fruchtkörper an Plattentyp-Nr. 298 (links) und -Nr. 290 (rechts)

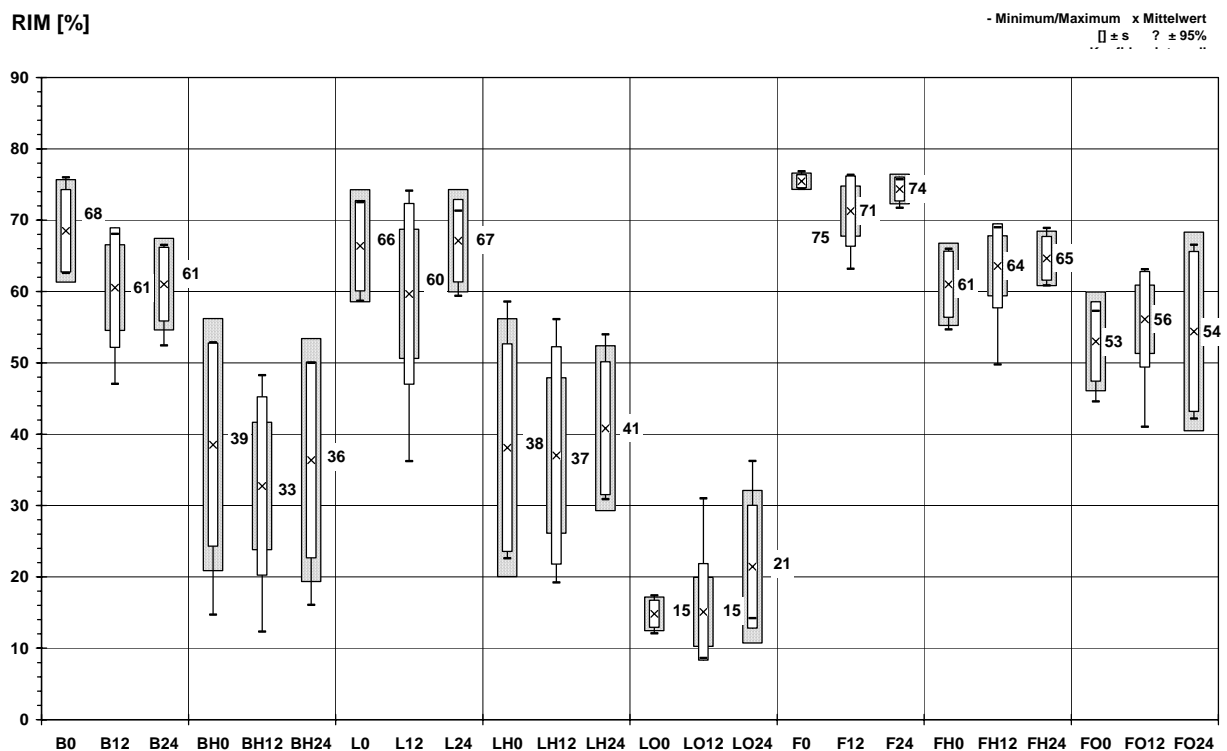


Abbildung 33: Resistance to Impact Milling (RIM) des Ausgangsmaterials (0), nach 12- (12) und nach 24-monatiger Bewitterung (24).

Der HEMI-Test an 24 Monate bewitterten Prüfkörpern erbrachte für die jeweiligen Materialien keine signifikant unterschiedlichen RIM-Werte (Abbildung 33).

3.6 Resistance to Impact Milling (RIM) von beschichteten Hölzern

Weder durch die aufgetragenen Beschichtungssysteme (Abbildung 34) noch durch das tief penetrierende Grundierungssystem (Abbildung 35) wurde die RIM signifikant beeinflusst. Somit ist auch eine Prüfung beschichteten Materials ohne vorherige Entfernung der Beschichtung möglich.

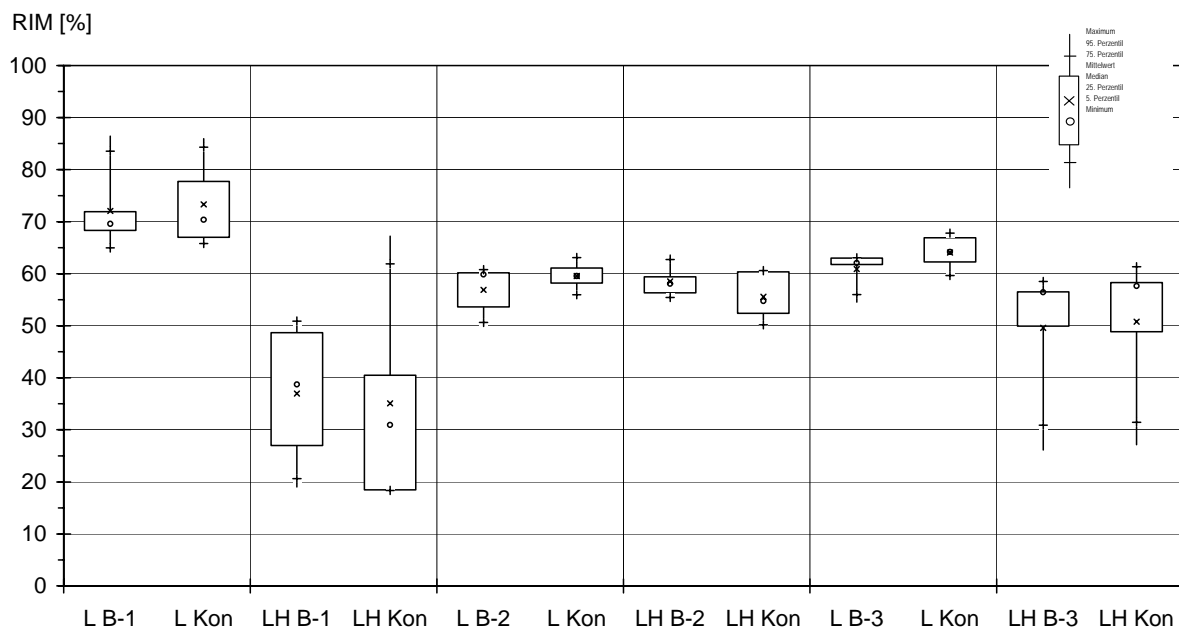


Abbildung 34: Resistance to Impact Milling (RIM) von beschichteten Hölzern und unbeschichteten Kontrollen (Kon)

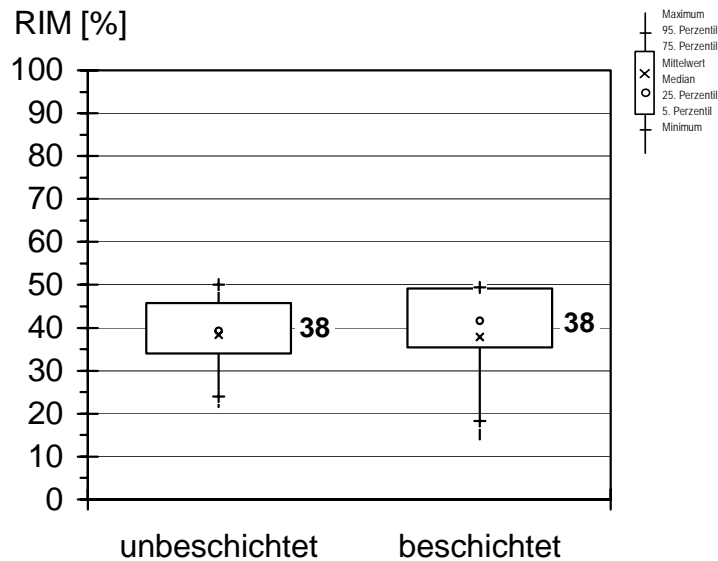


Abbildung 35: Resistance to Impact Milling (RIM) von beschichteter und unbeschichteter Buche (BH)

3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.7.1 Optimierung der Prüfmethode

Durch Adaptierung und Optimierung des HEMI-Tests und der L*+b*-Farbwertbestimmung konnte eine schnelle und zuverlässige Charakterisierung sowohl des thermisch modifizierten Ausgangsmaterials als auch des lamellenförmigen Materials erzielt werden. Als weitere Kenngröße zur Einschätzung der Vergütungsintensität lässt sich die ASE als Maß der Dimensionsstabilisierung anwenden. Die Bestimmung des Gesamtkohlenhydratgehaltes hat sich bislang nur für thermisch modifiziertes Fichtenholz als zweckmäßig erwiesen, eine Ableitung der Vergütungsintensität für thermisch modifiziertes Buchen- und Lärchenholz ist hingegen nicht möglich.

Der Abgleich der Ergebnisse mit den Resultaten der Abbauversuche in Anlehnung an DIN EN 113 (1996) wurde zur Justierung der bislang eingesetzten Methoden durchgeführt.

3.7.2 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Alle thermisch modifizierten Materialien wiesen eine für den bewitterten Außeneinsatz ausreichende Quellungsvergütung (ASE) auf. Die Ergebnisse der HEMI-Prüfung und der L*+b*-Farbwertbestimmung ergaben eine hohe Behandlungsintensität für Lärche OHT und Buche HT; die Ergebnisse für Fichte HT, Fichte OHT und Lärche

HT ließen auf eine zu geringe Behandlungsintensität schließen. Inwiefern die Vergütungsintensität für eine im Außeneinsatz notwendige Dauerhaftigkeitserhöhung ausreichend war, kann durch die nur zwei Jahre währende Freilandbewitterung nicht gezeigt werden. Auch die nach 24 Monaten Freilandbewitterung ermittelten RIM-Werte der vergüteten Hölzer unterschieden sich nicht signifikant von den unbehandelten Hölzern.

4 Verzeichnisse

4.1 Literatur

- BRISCHKE, C., 2003: Untersuchung der Eignung von Tannenholz für die thermische Modifikation. Diplomarbeit Universität Hamburg, Zentrum für Holzwirtschaft, 132 S.
- BURMESTER, A., 1973: Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 31 (6), 237–243
- BURO, A., 1954: Die Wirkungen von Hitzebehandlungen auf die Pilzresistenz von Kiefern- und Buchenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 12 (8), 297–304
- DIN 52 182, 1976: Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte.
- DIN 52 183, 1977: Prüfung von Holz; Bestimmung der Holzfeuchte.
- DIN EN 113, 1996: Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten. 17 S.
- DIN EN 350-1, 1994: Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz; Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz.
- DIN EN 252, 1989: Freiland-Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung eines Holzschutzmittels im Erdkontakt.
- DIROL, D.; GUYONNET, R., 1993: THE IMPROVEMENT OF WOOD durability by retification process. Stockholm: Intern. Res. Group Wood Pres., Doc.No.: IRG/WP 93-4005, 11 S.
- GYUHYEOK, K.; KIEON, Y.; JAEJIN, K., 1998: Effect of heat treatment on the decay resistance and the bending properties of radiata pine sapwood. Material und Organismen (1998) 32 (2), 101–108
- GIEBELER, E., 1986: Feuchte-Wärme-Druck-Vergütung von Holz. In: Vorträge der 17. Holzschutz-Tagung der DGfH, Berlin, 13 S.
- GOHAR, P.; GUYONNET, R., 1998: Development of wood retification process at the industrial stage. Intern. Res. Group Wood Pres. 1998: Proceedings of the 4th international Symposium "The Challenge Safety and Environment in Wood Preservation". 2.–3. Febr. 1998, Cannes, Mandelieu/France, Doc.No.: IRG/WP 98 50101, 173–183
- JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P., 1998: Heat treatment of wood. Better durability without chemicals. Nordiske Trebeskyttelsesdager, 47–51
- JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P., 2000: Heat treatment of wood in Finland – state of the art. In: Proceedings of the seminar on production of heat treated wood in Europe 20.11.2000 in Helsinki. Tekes Lahontorjuntayhdistys ry Kestopuu Oy 13 p.
- KAMDEM, D.P.; PIZZI, A.; GUYONNET, R.; JERMANNAUD, A., 1999: Durability of Heat-Treated Wood. Stockholm: Intern. Res. Group Wood Pres., Doc.No.: IRG/WP 99-40145, 15 S.
- LEITHOFF, H.; PEEK, R.-D., 1998: Hitzebehandlung – eine Alternative zum chemischen Holzschutz. Tagungsband zur 21. Holzschutz-Tagung der DGfH in Rosenheim: 97–108

- NICHOLAS, D.D., 1973: Wood Deterioration and its Prevention by Preservative Treatments. VOL 1: Degradation and Protection of Wood. Syracuse University Press. 380S. (S. 50) ISBN 0-8156-5037-X
- RAPP, A.O.; SAILER, M., 2000: Heat treatment of wood in Germany – state of the art. In: Proceedings of the seminar on production of heat treated wood in Europe 20.11.2000 in Helsinki. Tekes Lahontorjuntayhdistys ry Kestopuu Oy 15 p.
- RAPP, A. O. und SAILER, M., 2001: Oil-Heat treatment of wood in Germany – State of the art. European Commission, Directorate-General for Research, EUR 19885. Proceedings of the Special Seminar held in Antibes/France, 9 February 2001, 47-64
- RAPP, A.O.; SAILER, M.; BRANDT, K., 2003: Umweltfreundliche Konservierung von Massivholz und Massivholzprodukten für den Außenbereich. 170 S., Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Hamburg, Schlussbericht, BMBF-Förderkennzeichen: 0339862
- RAPP, A.O.; BRISCHKE, C.; WELZBACHER, C.R., 2006: Interrelationship between the severity of heat treatments and sieve fractions after impact ball milling: a mechanical test for quality control of thermally modified wood. *Holzforschung* 60: 64-70.
- RUYTER, H.; HORTULANUS, A., 1995: United States Patent: US5451361 Process for upgrading low quality wood. Shell Oil CO (US)
- SAILER, M.; RAPP, A.O.; LEITHOFF, H.; PEEK, R.-D., 2000: Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitze-Behandlung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 15–22
- SEBORG, R.M; TARKOW, H.; STAMM, A.J., 1953: Effect of Heat Upon Dimensional Stabilisation of Wood. *Journal of Forest Products Research Society* 3 (3), 59–67
- TJEERDSMA B.F.; BOONSTRA, M.; MILITZ, H., 1998: Thermal modification of non-durable wood species II. IRG/WP 98-40 124, 10 S.
- VERNOIS, M., 2000: Heat treatment of wood in France – state of the art. In: Proceedings of the seminar on production of heat treated wood in Europe 20.11.2000 in Helsinki. Tekes Lahontorjuntayhdistys ry Kestopuu Oy 6 p.
- VIITANEN, H.; JÄMSÄ, S.; PAAJANEN, L.; NURMI, A.; VIITANIEMI, P., 1994: The effect of heat treatment on the properties of spruce. A preliminary report. Stockholm: Intern. Res. Group Wood Pres., Doc.No.: IRG/WP 94-40032, 4 S.
- VIITANIEMI, P., 1997: Thermowood – Modified wood for improved performance. In: Trätec 1997: Proceedings of the 4th Eurowood Symposium “Wood – The Ecological Material”, 22.–23. September 1997, Stockholm / Sweden, Trätec Rapport No.: P 9709084, ISSN 1102-1071, 67–69
- WELZBACHER, C.R.; RAPP, A.O, 2003: Thermische Verfahren – Verfahrensübergreifender Vergleich von Materialien aus verschiedener industrieller Fertigung; erste Erfahrungsberichte zu verbaulichem, hitzebehandeltem Holz; neue Tendenzen. 23. Holzschutztagung der DGfH in Augsburg, 26-27. März 2003, S. 97-112
- WELZBACHER, C.R.; RAPP, A.O.; BRISCHKE, C., 2004: Arten und Eigenschaften von Thermoholz. Tagungsband: Bauen im Bestand, 4. Holzbauforum in Leipzig 2004, S. 142-167.

4.2 Abbildungen

Abbildung 1: Schnittzeichnung eines Edelstahlschlagbechers zur Durchführung des HEMI-Tests in einer Schwingscheibenmühle (links) und Aufsicht mit Richtungspfeilen zur Verdeutlichung der typisch rotierenden Bewegung (rechts)	16
Abbildung 2: HEMI-Prüfung: Edelstahlschlagbecher samt Fragmenten und Stahlkugeln.....	17
Abbildung 3: Korrelation aus Gesamtkohlenhydratgehalt von Fichte und Masseabnahme durch Öl-Hitzebehandlung oder einer Luft-Hitzebehandlung von Fichtenproben; aus: Rapp et al. 2003	21
Abbildung 4: Schematische Darstellung des CIE-Lab-Farbsystems. Das CIE-Lab-Farbsystem basiert auf den sogenannten psychologischen Grundfarben Rot, Grün, Blau und Gelb, aus denen sich das psychometrische Farbdigramm konstruieren lässt.	21
Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung einer horizontalen Doppellage mit Wasserfalle (rechter Bildausschnitt)	26
Abbildung 6: Korrelation der RIM unter Verwendung verschiedener Kugelmischungen mit der durch Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm) an Buche.....	29
Abbildung 7: Korrelation der RIM unter Verwendung verschiedener Kugelmischungen mit der durch Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm) an Fichte	30
Abbildung 8: Mittlere Masseabnahme durch Hitzebehandlung von jeweils 20 Prüfkörpern je Datenpunkt der drei verwendeten Holzarten Lärche, Buche und Fichte für Versuche zur Kalibrierung der innovativen Prüfmethode	31
Abbildung 9: Korrelation zwischen RIM _{1x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Lärche, Kugelmischung: 1x40mm, 3x12mm, 3x6mm.....	32
Abbildung 10: Korrelation zwischen RIM _{2x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Buche, Kugelmischung: 2x40mm, 3x12mm, 3x6mm.....	32
Abbildung 11: Korrelation zwischen RIM _{1x40} und Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm) für Fichte, Kugelmischung: 1x40mm, 3x12mm, 3x6mm.....	33
Abbildung 12: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Lärchenprüfkörpern in Abhängigkeit der Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung.....	34
Abbildung 13: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Buchenprüfkörpern in Abhängigkeit der Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung.....	34
Abbildung 14: Rest-Kohlenhydratgehalt (KH) von Fichtenprüfkörpern in Abhängigkeit der Masseabnahme (dm) durch eine thermische Vergütung	35
Abbildung 15: Die Änderung des kumulierten Farbwertes L*+b* durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme	36
Abbildung 16: Quellungsvergütung (ASE) der Buchenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm).....	37
Abbildung 17: Quellungsvergütung (ASE) der Lärchenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm).....	37
Abbildung 18: Quellungsvergütung (ASE) der Fichtenprüfkörper durch Hitzebehandlung korreliert mit der durch die Hitzebehandlung verursachten Masseabnahme (dm).....	38
Abbildung 19: RIM der verschiedenen Ausgangsmaterialien für die Plattenherstellung; n=5.....	39
Abbildung 20: Kumulierter Farbwert L*+b* der verschiedenen Ausgangsmaterialien	41
Abbildung 21: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen <i>Poria placenta</i> ; Inkubationszeit: 8 Wochen	42
Abbildung 22: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen <i>Coriolus versicolor</i> ; Inkubationszeit: 8 Wochen	43
Abbildung 23: Korrigierter Masseverlust der verschiedenen Materialien nach Pilzprüfung gegen <i>Coniophora puteana</i> ; Inkubationszeit: 8 Wochen	43
Abbildung 24: Quellung der verschiedenen Ausgangsmaterialien; n = 20.....	45
Abbildung 25: Dimensionsstabilisierung durch Hitzebehandlung im Vergleich zu unbehandelten Prüfkörpern ausgedrückt als ASE (Anti Swelling Efficiency); n = 20	45
Abbildung 26: Resistance to Impact Milling (RIM) von zusätzlich (Nachlieferung) und ursprünglich (1.Charge) hergestelltem Ausgangsmaterial	47
Abbildung 27: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Buche.....	48
Abbildung 28: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Fichte.....	48

Abbildung 29: Korrelation zwischen Masseverlust durch Pilzabbau und RIM von Lärche.....	49
Abbildung 30: Oberlage der Laborplatten nach 24-monatiger Freibewitterung.....	50
Abbildung 31: Unterlage der Laborplatten nach 24-monatiger Freibewitterung.....	50
Abbildung 32: Fruchtkörper an Plattentyp-Nr. 298 (links) und –Nr. 290 (rechts).....	51
Abbildung 33: Resistance to Impact Milling (RIM) des Ausgangsmaterials (0), nach 12- (12) und nach 24- monatiger Bewitterung (24).....	51
Abbildung 34: Resistance to Impact Milling (RIM) von beschichteten Hölzern und unbeschichteten Kontrollen (Kon).....	52
Abbildung 35: Resistance to Impact Milling (RIM) von beschichteter und unbeschichteter Buche (BH).....	53

4.3 Tabellen

Tabelle 1: Holzart, Behandlung und Lieferform des Ausgangsmaterials.....	12
Tabelle 2: Anzahl der Prüfkörper für Versuche zur Optimierung der Kugelmischung.....	18
Tabelle 3: Übersicht der während der HEMI-Prüfung auftretenden Beanspruchungsarten, zugeordnete Praxisbeispiele und entsprechende Normprüfungen.....	19
Tabelle 4: Zeitintervalle der thermischen Vergütung der Prüfkörper für Versuche zur Kalibrierung der Prüfmethoden.....	24
Tabelle 5: Inkubationsintervalle und Prüfkörperanzahl der verschiedenen Holzart/Prüfpilz-Kombinationen zur Erstellung von Kalibrierkurven für die Fäulnisfrüherkennung (<i>C.v.</i> = <i>Coriolus versicolor</i> , <i>C.p.</i> = <i>Coniophora puteana</i>).....	25
Tabelle 6: Plattentypbezeichnungen und –aufbauten der im Labormaßstab gefertigten Platten.....	26
Tabelle 7: Bewertungskriterien für die Proben in Anlehnung an DIN EN 252 (1989).....	27
Tabelle 8: Klassifikation auf Basis von DIN EN 252 (1989).....	28
Tabelle 9: Parameter für Untersuchung zum Einfluss von Beschichtungen auf die RIM (n=5, für jedes Ausgangsmaterial wurden n=5 unbeschichtete Kontrollen geprüft).....	28
Tabelle 10: Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten RIM-Werten.....	40
Tabelle 11: Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten L*+b*-Werten.....	41
Tabelle 12: Einstufung der verschiedenen Materialien in Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit (DKL) nach DIN EN 350-1 (1994) basierend auf den Ergebnissen nach 8 Wochen Pilzangriff durch <i>Poria placenta</i> und <i>Coriolus versicolor</i> in Anlehnung an DIN EN 113 (1996).....	44
Tabelle 13: Einschätzung der Vergütungsintensität des Ausgangsmaterials, ausgedrückt durch die berechnete Masseabnahme durch Hitzebehandlung (dm), basierend auf den ermittelten ASE-Werten.....	46

4.4 Gleichungen

Gleichung 1: Rohdichte.....	13
Gleichung 2: Holzfeuchte.....	14
Gleichung 3: Mittelwert.....	14
Gleichung 4: Varianz ($s \geq 0$).....	14
Gleichung 5: Standardabweichung.....	14
Gleichung 6: Konfidenzintervall.....	15
Gleichung 7: Prüfgröße \hat{t} nach Student.....	15
Gleichung 8: Berechnung der RIM.....	17
Gleichung 9: Integritätsgrad <i>I</i>	17
Gleichung 10: Masseabnahme durch Pilzangriff:.....	22
Gleichung 11: maximale Quellung α	23
Gleichung 12: mittlere maximale Quellung.....	23
Gleichung 13: ASE.....	23
Gleichung 14: Dauerhaftigkeitswert x	27

