

Abschlussbericht

Zuwendungsgeber:

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und
Verbraucherschutz (BMELV)

Vom BMELV beauftragter Projektträger:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Zuwendungsempfänger:

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft

Förderkennzeichen:

22022007

Vorhabensbezeichnung:

Innovatives Feuchte-Wärme- Druck-Verfahren zur thermischen Modifizierung von Holz

- Untersuchungen zu holztechnologischen und
holzbiologischen Eigenschaften von
hygro-thermisch behandelten einheimischen Holzarten -

Kurztitel:

Thermoholz nach dem WTT-Verfahren

Laufzeit des Vorhabens:

01.03.2008 – 31.08.2009

Berichtszeitraum:

01.03.2008 – 31.08.2009

„Innovatives Feuchte-Wärme- Druck-Verfahren zur thermischen Modifizierung von Holz“

Untersuchungen zu holztechnologischen und
holzbiologischen Eigenschaften von
hygro-thermisch behandelten einheimischen Holzarten

Forschungsbericht



**Freiburg im Breisgau
Februar 2010**

Herausgeber:

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft
Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Wissenschaftliche Leitung des Vorhabens

Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft

Prof. Dr. Siegfried Fink
Professur für Forstbotanik, Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie

Projektkoordination

Dr. Denny Ohnesorge
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft

Wissenschaftliche Bearbeitung:*Holztechnologische Untersuchungen:*

Dipl. Forstwirtin Inga Krowas	Institut für Forstbenutzung und
M. Sc. Claudia Stoleru	Forstliche Arbeitswissenschaft
Dipl. Forstingenieur (FH) Jörg Müller	

*Holzbiologische Untersuchungen:***Erdkontaktversuche**

Dr. Denny Ohnesorge	Institut für Forstbenutzung und
Dipl. Forstwirtin Inga Krowas	Forstliche Arbeitswissenschaft
Dipl. Forstwirt Sebastian Schroll	

Agarblocktests

Dipl. Forstwirtin Andrea Tausch	Professur für Forstbotanik, Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie
Dr. Denny Ohnesorge	Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft

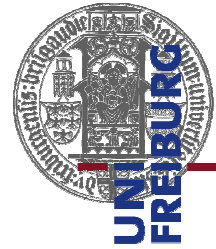
Gemeinschaftliches Forschungsprojekt der Kooperationspartner:



**Ets Röthlisberger SA
Corbat Holding SA,
Schweiz**



**Wood Treatment
Technology,
Dänemark**



**Albert-Ludwigs
Universität Freiburg,
Deutschland**

Förderhinweis:



Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundes vom Deutschen Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert. Das Unternehmen Ets. Röthlisberger SA wurde vom Schweizer Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung (WHFF) finanziell unterstützt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Kontakt Daten der Kooperationspartner:

Corbat Holding SA

Ets. Röthlisberger SA,
Rue de la Gare 28
CH-2855 Glovelier, Schweiz
Telefon: (+41) 32-427-0404
Telefax: (+41) 32-426-6705
Email: Info@etsroethlisberger.ch
Web: www.corbat-holding.ch

Wood Treatment Technology

WTT A/S,
Jyllandsvej 9,
DK 7330 Brande, Dänemark
Telefon: (+45) 97-18-1088
Telefax: (+45) 97-18-1099
Email: wtt@wtt.dk
Web: www.wtt.dk

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft

Werthmannstr. 6
79085 Freiburg, Deutschland
Telefon: (+49) 761-203 3764
Telefax: (+49) 761-203 3763
Email: institut@fobawi.uni-freiburg.de
Web: www.fobawi.uni-freiburg.de

Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie

Professur für Forstbotanik
Bertoldstr. 17
79085 Freiburg, Deutschland
Telefon: (+49) 761-203-3649
Telefax: (+49) 761-203-3650
Email: forstbotanik@fobot.uni-freiburg.de
Web: www.forstbotanik.uni-freiburg.de

Assoziierter Projektpartner:

Houtdroogbedrijf Willems BV

Metaalweg 9
5804 CG Venray, Niederlande
Telefon: (+31) 478 588007
Telefax: (+31) 478 589955
E-mail: info@houtdrogerij.nl

Inhaltverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG.....	III
SUMMARY	V
1 KURZE DARSTELLUNG DES VORHABENS	1
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4 Stand des Wissens	4
1.4.1 Modifikation von Holz	4
1.4.2 Verfahren der thermischen Modifikation – ein Überblick	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2 ANGEWANDTE METHODEN	9
2.1 Herkunft und Vorbereitung des Materials	9
2.2 Hygro-thermische Modifikation.....	9
2.3 Wahl des Prüfverfahrens und Ausformung der Prüfkörper	9
2.4 Holztechnologische Untersuchungen.....	10
2.4.1 Physikalische Holzeigenschaften.....	10
2.4.2 Mechanische Holzeigenschaften	11
2.5 Holzbiologische Untersuchungen	13
2.5.1 Allgemeines	13
2.5.2 Versuchsübergreifende Vorbereitungen	14
2.5.3 Erdkontaktversuche	17
2.5.4 Agarblocktests zur Ermittlung der natürlichen Dauerhaftigkeit.....	19
2.5.5 Statistische Auswertungen.....	22
3 ERZIELTE ERGEBNISSE	23
3.1 Holztechnologische Untersuchungen.....	23
3.1.1 Physikalische Holzeigenschaften.....	23
3.1.2 Mechanische Holzeigenschaften	25
3.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen	28
3.2 Holzbiologische Untersuchungen	29
3.2.1 Erdkontaktversuche	29
3.2.2 Agarblocktests zur Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit.....	33
3.2.3 Holzfeuchte nach Bepilzung.....	40
3.2.4 Effekt der Auswaschung nach EN 84.....	43
3.2.5 Einstufung in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen	44
3.3 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen.....	47
3.4 Vergleich der Ergebnisse zu anderen Holzmodifizierungsverfahren	51

3.4.1	Andere europäische Hitzemodifikationsverfahren.....	51
3.4.2	Thermische Modifikation unter Stickstoff-Atmosphäre	52
3.4.3	Acetyliertes Holz (Accoya Holz)	52
3.4.4	Furfuralisierung (Kebony Holz, VisorWood)	53
3.4.5	Modifiziertes Buchen- und Kiefernholz mittels DMDHEU	54
3.5	Erkenntnisse von Dritten	54
4	VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT	55
4.1	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	55
4.2	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	55
4.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	55
4.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	57
5	VERZEICHNISSE.....	59
5.1	Abkürzungen	59
5.2	Normen und Merkblätter	59
5.3	Literaturverzeichnis	60
5.4	Abbildungsverzeichnis	64
5.5	Tabellenverzeichnis.....	65
6	ANHANG	67
6.1	Prüfkörperumfang	67
6.2	Detaillierergebnisse der holztechnologischen Untersuchungen.....	70
6.3	Prüfberichte der holzbiologischen Untersuchungen	79

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird über die Ergebnisse des Forschungsprojektes „*Innovatives Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren zur thermischen Modifizierung von Holz*“ berichtet, in dessen Rahmen die Eigenschaften von hygro-thermisch behandeltem Holz untersucht wurden. Dazu wurden aus je drei Stämmen der Holzarten Buche, Esche, Eiche, Fichte, Kiefer und Tanne Bretter aus dem Splint- und Kernbereich gewonnen. Jedes Brett wurde nach der technischen Trocknung auf 10 bis 12 % entsprechend der drei Untersuchungsvarianten in drei Teile von etwa 120 cm Länge aufgetrennt. Die Behandlung des Holzes erfolgte durch ein hygro-thermisches Kesseldruckverfahren beim Projektpartner Ets Röthlisberger SA in Glovelier (Schweiz) in einer Pilotanlage des dänischen Anlagenherstellers "WTT-Wood Treatment Technology". Folgende Varianten wurden für jede Holzart untersucht: unbehandeltes, getrocknetes Vergleichsholz, bei 160°C behandeltes Holz und bei 180°C behandeltes Holz.

Die Versuche gliedern sich in einen holztechnologischen und einen holzbiologischen Teil. In der ersten Versuchsphase wurden Kennwerte zum Quell- und Schwindverhalten, dem Sorptionsverhalten, der Dimensionsstabilität sowie der Festigkeitseigenschaften ermittelt. Im Anschluss daran wurden in einer zweiten Phase holzbiologische Versuche zur Ermittlung der Pilzresistenz der behandelten Hölzer durchgeführt.

Als Ergebnis der thermischen Behandlung zeigte sich eine starke Abnahme des Quell- und Schwindverhaltens bei allen hygro-thermisch behandelten Hölzern. Bei allen Holzarten war weiterhin für die behandelten Hölzer eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit festzustellen. Bereits ab einem relativen Luftfeuchtigkeitsgehalt von 20% sind deutlich Unterschiede im Holzfeuchtigkeitsgehalt zwischen dem unbehandelten und den thermisch behandelten Hölzern erkennbar. Die verringerte Feuchtigkeitsaufnahme führte für alle untersuchten Holzarten zu einer Dimensionsstabilisierung. Um den Einfluss der thermischen Behandlung auf die Festigkeitseigenschaften der behandelten Hölzer zu beurteilen, wurden Untersuchungen zum Masseverlust, zur Brinell-Härte, Biegefestigkeit und Biege-E-Modul sowie zur Bruchschlagarbeit an, im Normklima konditionierten, fehlerfreien Normproben durchgeführt.

Weiterhin war die Darrdichte der thermisch behandelten Hölzer entsprechend dem Substanzabbau gegenüber der unbehandelten Variante verringert. Die Normal-Rohdichte (konditioniert bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit) verringerte sich zusätzlich durch die reduzierte Feuchtigkeitsaufnahme des behandelten Holzes.

Infolge der thermischen Behandlung nahm grundsätzlich die Festigkeit des Holzes ab. So verringerte sich beispielsweise die Bruchschlagarbeit infolge der thermischen Behandlung bei Buche und Esche bei höherer Temperatur deutlich. Nach der Behandlung mit 160°C war die Bruchschlagarbeit für Buche um 39 % und bei einer 180°C-Behandlung um 55 % reduziert. Esche und Eiche wiesen ähnlich hohe Rückgänge auf. Für die Nadelhölzer wurden hingegen etwas geringere Abnahmen der Bruchschlagarbeit beobachtet. Die Ergebnisse zeigten für alle Holzarten ebenfalls eine deutliche Reduktion der Biegefestigkeit durch die thermische Behandlung. Am stärksten war der Rückgang bei Fichte und Buche. Dort verringerte sich die Biegefestigkeit jeweils um etwa 37% (bei einer Behandlungstemperatur von 160°C). Die Steifigkeit der Hölzer, ausgedrückt durch den Elastizitätsmodul blieb überwiegend auf dem gleichen Niveau wie beim unbehandelten Holz. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass die geringere Ausgleichsfeuchtigkeit der thermisch behandelten Proben zur Ermittlung höherer Biegefestigkeits- und Steifigkeitskennwerte beitrug.

Zur Beurteilung der Resistenz der thermisch behandelten Hölzer gegenüber pilzbedingtem Holzabbau, erfolgten Laborversuche in Anlehnung an ENV 807 (CEN/TS 15083-2: Moderfäule – Erdkontaktversuche) und an EN 113 (CEN/TS 15083-1: Basidiomyceten – Agarblocktests). Alle Prüfkörper wurden vor Versuchsbeginn einer Auswaschung nach EN 84 unterzogen, welche gewöhnlich vor biologischen Laborversuchen durchgeführt wird.

Als Ergebnis wurde bei allen Holzarten ein deutlich geringerer befallsbedingter Masseverlust bei den thermisch behandelten Prüfkörpern beobachtet. Insbesondere zeigte sich bei den Laubhölzern, dass der Masseverlust weiter reduziert war, wenn die Hölzer bei 160°C statt bei 180°C behandelt wurden. Erwartungsgemäß zeigte das unbehandelte Buchenholz den größten Masseverlust, aber auch den stärksten Effekt der thermischen Behandlung. Die Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen (DHK) gemäß CEN/TS 15083-2 ergab für die thermisch behandelten Laubhölzer – insbesondere für Buchenholz – eine deutlich höhere DHK. Je nach Behandlungsstufe, konnte die Dauerhaftigkeit bis zur DHK 1 gesteigert werden.

Für die Agarblocktests wurden ähnlich gute Ergebnisse erzielt. Erwartungsgemäß zeigten wiederum die thermisch behandelten Holzproben einen deutlich niedrigeren Masseverlust (d.h. erhöhte Pilzresistenz) als unbehandelte Holzproben. Der positive Effekt der thermischen Behandlung zeigte sich für Nadelhölzer deutlicher bei der Temperaturvariante 180°C. Hier lag der höchste erreichte Masseverlust bei 10 %, während die Behandlungsstufe 160°C zu einem Masseabbau von bis zu 26 % bei Kiefern Splintholz führte. Bei den Laubhölzern resultierte bereits die niedrigere Temperaturbehandlung (160°C) in eine deutlich verbesserte Pilzresistenz bei den Holzarten Buche und Esche. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde eine vorläufige Einstufung der geprüften Holzproben in natürliche DHK nach CEN/TS 15083-1 vorgenommen. Die thermische Behandlung führte bei allen Prüfholzarten (außer Kiefern Kernholz 160°C) zu einer Steigerung der natürlichen Dauerhaftigkeit. Insbesondere die stärkere thermische Behandlung (180°C) bewirkte eine deutliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit z.B. von Buchenholz. So änderte sich die DHK von 5 (nicht dauerhaft) für unbehandelte Proben in DHK 2 (dauerhaft), zum Teil auch DHK 1 (sehr dauerhaft). Beispielsweise änderte sich die Klassifikation von Esche und Tanne von ursprünglich „nicht dauerhaft“ (DHK 5) zu „sehr dauerhaft“ (DHK 1) nach thermischer Behandlung bei 180°C.

Trotz eines verbesserten Quell- und Schwindverhaltens der behandelten Hölzer sollte je nach Gebrauchsbedingungen weiterhin mit einem Arbeiten des Holzes gerechnet werden. Für Anwendungen im Außenbereich erscheint für von Natur aus nicht oder nur wenig dauerhafte Hölzer eine höhere Behandlungsintensität erforderlich. Hierbei sind je nach Produkt jedoch die verminderten Festigkeitseigenschaften zu berücksichtigen. Von einem Einsatz im Lasten tragenden Bereich sollte wie bei anderen thermischen Modifizierungsverfahren vorerst abgesehen werden. Da im Rahmen dieser Untersuchung ausschließlich fehlerfreie Normprüfkörper verwendet wurden, sind die Ergebnisse nicht auf Produkte in Gebrauchsgröße übertragbar. Hier ist nicht zuletzt die Qualität des Ausgangsmaterials sowie die Art und Weise des Gebrauchs entscheidend. Insbesondere sind langfristige Freilandversuche erforderlich, um die ermittelten Resistenzen gegenüber holzerstörenden Organismen auch unter realen Klimabedingungen zu bestätigen und eine Zuordnung zu Gebrauchsklassen nach DIN 335-1 zu ermöglichen.

Summary

In the project “Hygrothermal Modification of Wood by the WTT-process”, the technological and biological properties of wood after thermal treatment were investigated. One segment from each of the wood species was then subjected to one of the following thermal treatments: untreated dried wood as control samples, wood treated at 160°C and wood treated at 180°C. The wood treatment process was undertaken by the Swiss project partner, Ets Röthlisberger SA, Glovelier (Switzerland), in a trial heat treatment kiln produced by the Danish company, WTT – Wood Treatment Technology. The wood was treated by a hygrothermal, or pressurized-thermal, process. Boards from the heartwood and sapwood were cut from three stems each of beech, ash, oak spruce, pine and fir. After drying the boards to 10 – 12 % moisture content, each board was divided into three segments about 120 cm in length. The study was divided into the wood technology and wood biology components. In the first phase of the research, parameters for swelling-shrinkage, sorption, dimensional stability and strength properties were determined. Subsequently, in the second phase, the wood biology trials were conducted to determine fungal resistance of the treated wood.

The tests revealed a strong reduction in the swelling-shrinkage in all wood subjected to the hygrothermal treatment. This led to an increase in dimensional stability. A reduction in the sorption capacity was identified for the treated wood of all wood species. At a relative humidity of only 20 %, clear differences in wood moisture content between the untreated and thermally treated wood were evident. The lower moisture absorption led to stabilization in dimensions for all wood species tested, which was more evident in the hardwoods due to their naturally high swell-shrink variation than in the softwoods.

To assess the degree of change in strength properties in the treated wood, tests were conducted on the defect-free control samples conditioned under normal climatic conditions to determine weight loss, Brinell hardness bending strength, static modulus of elasticity (MOE), and also impact strength of these samples.

Following results were obtained: The decrease in the oven-dry density of the thermally-treated wood compared to the untreated wood corresponds to the degradation of wood substances. The bulk density of the treated wood (conditioned at 20°C and 65% relative humidity) also declines due to the reduction in moisture uptake.

The thermal modification led to a decrease in strength. For example, the decrease in beech impact bending strength at 160°C, and at 180°C was about 39 %, and 55 % respectively. In contrast, the softwood revealed a smaller decrease in impact bending strength. Furthermore, for all wood species a distinct reduction in bending strength as a result of the thermal treatment was observed. The greatest reduction was found in treated spruce and beech. For both these species, the bending strength declined by about 37 % (treatment temperature of 160°C). In contrast, the stiffness of the wood samples remained largely the same as the untreated wood samples. However, the lower equilibrium moisture content of the thermally-treated samples contributed to both the increase in bending strength and in stiffness.

To assess the resistance of thermally-treated wood to decay caused by fungal infection, laboratory trials were carried out accord with the ENV 807 (CEN/TS 15083-1: soft-rotting microfungi – soil contact trials), and EN 113 (CEN/TS 15083-2: basidiomycetes – agar-block tests) for the determination of the natural durability in keeping with EN 350-1. Prior to commencing

the trial, all wood samples were subjected to a leaching procedure (EN 84) typically conducted prior to biological laboratory trials.

For the soil contact trials following results were obtained: The weight loss of the thermally-treated wood samples was lower than the untreated samples for all wood species. When a treatment temperature of 180°C instead of 160°C was adopted, the weight loss of all wood species, but especially the hardwoods, was even lower. As expected the untreated beech wood demonstrated greatest weight loss. However, the strongest effect from the thermal treatment was obtained for beech wood samples as well. A preliminary classification into durability classes in keeping with CEN/TS 15083-2 showed that the thermally-treated hardwoods, in particular beech, could be allocated to a higher durability class (DC) than the untreated variants. Depending on the treatment durability class 1 (very durable) could be reached for beech wood.

For the agar-block-tests, the same positive effect of an improved resistance after thermally treatment could be observed. As expected the thermally-treated wood samples of all wood species revealed a markedly lower weight loss than the untreated control samples. The positive effect of the thermal treatment was more apparent still in softwoods subjected to the 180°C temperature treatment. Here, the highest weight loss reached was about 10 %, whereas, for the 160°C temperature treatment, the weight loss amounted to 26 % in pine sapwood. For the hardwoods, fungal resistance was clearly better in the beech and ash wood species at the lower temperature treatment (160°C). The results showed clearly that the dry rot fungus led to a minimal weight loss in the treatment variants of all three hardwood species, yet weight loss was very high in the softwood variants. Based on these results, a preliminary classification of the wood samples into natural durability classes (DC) adopting the CEN/TS 15083-1 standard was undertaken. With the exception of the pine heartwood – 160°C variant, thermal treatment increased the natural durability of all sample variants. In particular, the higher thermal treatment (180°C) clearly increased the durability of those untreated wood species in durability class 5 (not durable) to at least DC 2 (durable), and some to DC 1 (very durable). For example, the classification of ash and fir changed from the initial “not durable” (DC 5) to “very durable” (DC 1) after thermal treatment at 180°C.

Despite improved swelling-shrinkage behavior in the treated wood, it is not complete stable and dimensional changes will depend upon the conditions of use. For external use it appears that those timbers with naturally little or no durability require higher treatment intensity. Here, however, one must weight this change against the reduction in wood strength properties in relation to the intended use of the commercial timber. As with other thermal treatment procedures, the timber treated with this method should be tested before utilization in load-bearing constructions. As, in this investigation, only standard wood samples free of defects were tested, the results provide merely an indication of the treated wood properties. Variation in the results may arise for commercial-sized products. Here the quality of the initial wood as well as the manner of timber use is of critical importance. In particular, long-term field studies are required to test the wood resistance to the wood-decaying organisms under real climate conditions for classification into timber use classes according to DIN 335-1.

1 Kurze Darstellung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Beliebtheit von Holz als Material für Innen- und Außenanwendungen, vor allem auch im Bereich Leben und Wohnen, steigt stetig. Dies ist unter anderem auf die Tatsache zurückzuführen, dass Holz ein nachwachsender und umweltfreundlicher Rohstoff ist. Insbesondere beim Einsatz im Außenbereich ist es aufgrund der spezifischen Eigenschaften dieses natürlichen Materials jedoch notwendig, Holz gegen den Angriff durch Holz zerstörende Pilze und Insekten zu schützen. Aber auch der Einsatz von Holz im Innenbereich birgt Probleme in sich, insbesondere in Räumen mit großen Schwankungen im Luftfeuchtigkeitsgehalt, wie zum Beispiel in Bad und Sauna. Ein ausreichender Holzschutz wurde in der Vergangenheit überwiegend durch konservative Maßnahmen, vor allem durch den Einsatz chemischer Mittel erreicht oder es wurden von Natur aus sehr dauerhafte Hölzer – bei denen es sich überwiegend um Tropenhölzer handelt – eingesetzt. Über den Einsatz chemischer Holzschutzmittel wurden in den vergangenen Jahren aufgrund der Auswirkungen dieser Mittel auf die Umwelt und die Verbraucher intensive Diskussionen geführt. Der alternative Einsatz von Tropenhölzern steht jedoch aufgrund der zunehmenden Zerstörung der Tropenwälder in der Kritik.

In den vergangenen Jahren wurden Techniken bis zur Praxisreife entwickelt, mit denen Holz auf dem Wege einer thermischen Behandlung ohne den Einsatz von Chemikalien dauerhafter und dimensionsstabiler gemacht werden kann. Zudem erhalten Hölzer durch die thermische Behandlung dunklere, warme mit Tropenhölzern vergleichbare Farbtöne. Dadurch kann der Einsatzbereich heimischer Hölzer ausgeweitet und ihre Wertschöpfung erhöht werden.

Derzeit sind mehrere unterschiedliche Technologien und Prozesse zur thermischen Behandlung von Holz auf dem Markt. Die variierende Behandlungs- und Prozessparameter machen einen direkten Vergleich der angewandten und untersuchten Verfahren und die daraus resultierenden Änderungen der Holzeigenschaften schwierig. Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens war, die holztechnologischen und holzbiologischen Eigenschaften von mit dem WTT-Verfahren hygro-thermisch behandelten Hölzern experimentell zu untersuchen. Das WTT-Verfahren, soll sowohl bei den Investitionskosten als auch bei den laufenden Prozesskosten günstiger als vergleichbare Verfahren sein, und könnte so auch für kleine und mittelständische Betriebe (KMU) interessant sein.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben war interdisziplinär, international und praxisbezogen ausgerichtet. Der dänische Projektpartner WTT A/S ist Anlagenbauer für industrielle Holzschutz- und Holz Trocknungsanlagen und brachte sein technisches Wissen insbesondere zum Behandlungsprozess in das Projekt mit ein. Das schweizerische Unternehmen ETS Röthlisberger SA (CORBAT Holding SA) bezog eine Pilotanlage des Herstellers WTT A/S zur thermischen Modifikation von Holz. ETS Röthlisberger führten nach einer Phase der Anlagenkalibrierung erste Behandlungsversuche unter industriellen Bedingungen durch.

Tabelle 1: Am Vorhaben beteiligte Partner

Partner	Bezeichnung	Akronym
Industrie	ETS Röthlisberger SA (CORBAT Holding SA)	ETS
	WTT A/S	WTT
	Willems Houtdroogbedrijf BV	WH
Wissenschaft	Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg	FobAwi
	Professur für Forstbotanik der Universität Freiburg	FoBot

Anschließend erfolgte in Absprache mit den universitären Forschungspartnern die Auswahl, Behandlung und Lieferung des Versuchsholzes. Die Vorbereitung des Probenmaterials und die Durchführung der experimentellen Versuche erfolgten am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft in enger Zusammenarbeit mit der Professur für Forstbotanik der Universität Freiburg, vor allem im Bereich der holzbiologischen Untersuchungen.

Die Durchführung der holzbiologischen Untersuchungen erfolgte unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse anderer wissenschaftlicher Einrichtungen, die sich ebenfalls mit der Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit von thermisch modifiziertem Holz beschäftigen. So wurde beispielsweise bereits in der Vorbereitungsphase Kontakt zum Institut für Holztechnologie und Holzbiologie des heutigen Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI), zum Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) und zur Abteilung Holz der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungs-Anstalt (Empa) der Schweiz aufgenommen. Vom IHD Dresden sowie von der Empa wurden zudem Prüfpilze für die Durchführung der Agarblocktests bezogen.

Eine weitere Besonderheit dieses Vorhabens war, dass sich die normativen Regelungen, welche für die holztechnologischen und holzbiologischen Prüfungen des thermisch modifizierten Holzes herangezogenen wurden, noch in der Entwurfsphase befanden. Eine spätere, ggf. auch nur teilweise, Modifikation der Testverfahren bzw. der Beurteilungskriterien ist also durchaus denkbar.

Während der gesamten Projektdauer bestand ein intensiver Kontakt und Informationsaustausch zwischen den Praxispartnern und den beiden wissenschaftlichen Einrichtungen. Die praxisnahe Ausrichtung des Projekts sowie das große Interesse von vielen Marktteilnehmern an dem untersuchten Verfahren erforderte eine frühzeitige Aufbereitung und Kommunikation von Teilergebnissen. Dies sicherte die Berücksichtigung praxisrelevanter Fragestellungen, vor allem auch in Bezug auf die spätere Erfüllung marktspezifischer Bedürfnisse.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In der ersten Phase des Projekts wurden die holztechnologischen Eigenschaften – insbesondere die Sorptionseigenschaften, die Dimensionsstabilität und die Festigkeitseigenschaften der behandelten Hölzer untersucht. In einer zweiten Projektphase folgten holzbiologische Laborversuche zur Resistenz der behandelten Hölzer gegenüber Pilzen und erdbewohnenden Mikroorganismen. Die Detailplanung und die an den Arbeitsschritten jeweils beteiligten Partner sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 2: Detailplanung des Vorhabens und beteiligte Partner

Arbeitspaket	Arbeitsschritte	Partner
1) Kenntnisstand	Literaturstudium / Stand des Wissen	FobAwi / FoBot
2) Versuchsvorbereitung	a) Feinabstimmung Versuchsplan	alle
	b) Vorbereitung Versuchsanlage	WTT / Ets
	c) Materialbereitstellung und Durchführung thermische Behandlung	Ets
	d) Prüfkörperzuschnitt und Vorbereitung	FobAwi
	e) Anzucht Pilzkulturen	FoBot
3) Holztechnologischen Untersuchungen	a) Festigkeitseigenschaften	FobAwi
	b) Dimensionsstabilität und Sorptionseigenschaften	FobAwi
	c) Versuchsauswertung	FobAwi
4) Prozessoptimierung	a) Auswahl der optimalen Prozessparameter, Holzarten und Untersuchungsvarianten für weitere Untersuchungen	alle
	b) Technische Optimierung der Anlage und des Prozesses	WTT / WH / Ets
5) Holzbiologischen Untersuchungen	a) Prüfung auf Widerstandsfähigkeit gegen Holz zerstörende Basidiomyceten (CEN/TS 15083-1 / EN 113)	FoBot / FobAwi
	b) Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen (CEN/TS 15083-1 / ENV 807)	FobAwi / FoBot
	c) Versuchsauswertung (Datenauswertung, Einstufung der jeweiligen Holzarten und Untersuchungsvarianten in Dauerhaftigkeitsklassen nach DIN EN 350-1)	FobAwi / FoBot
6) Dokumentation und Publikation	a) Prüfberichte: protokollierte Ergebnisse der Laborversuche	FobAwi / FoBot
	b) Kurzberichte: Kurzdarstellung des Projekts und der Ergebnisse	
	c) Abschlussbericht: Detaillierte Schilderung der Methodik und der Ergebnisse der holztechn. und holzbiol. Versuche	
7) Umsetzung in die Praxis	Durchführung von Workshops, Vorträge auf Fachtagungen, Veröffentlichungen, Messebeiträge	alle

1.4 Stand des Wissens

1.4.1 Modifikation von Holz

Erste experimentelle Untersuchungen zur thermischen Modifizierung von Holz wurden in den 1930er Jahren von STAMM und HANSEN (1937) durchgeführt, mit dem Ziel die Hygroskopizität sowie das Quell- und Schwindverhalten zu vermindern. Dazu wurden Hölzer in verschiedenen Gasen – Wasserstoff, Leuchtgas, Luft, Sauerstoff – bei Temperaturen zwischen 165°C und 260°C erhitzt. Aus diesen Versuchen wurde zum einen die Erkenntnis gewonnen, dass die Holzfeuchte den thermischen Modifizierungsvorgang stark beeinflusst und zum anderen, dass die Anwesenheit von Sauerstoff während des Prozesses die Festigkeitswerte drastisch verschlechtert. In den 1940er Jahren untersuchten SEBORG et al. (1944) den Einfluss hoher Temperaturen auf Holz – in Abhängigkeit von Luftzutritt/Luftabschluss sowie der Anwesenheit von Feuchtigkeit im Holz als auch in der Luft. Weitere Ansätze zur Verminderung des Quell- und Schwindverhaltens durch thermische Modifizierung wurden zum Beispiel von STAMM et al. (1946) unternommen. Dabei wurde trockenes Holz, das zur Verhinderung von Oxidation in einer Metallschmelze gelagert wurde, auf Temperaturen zwischen 140°C und 320°C erwärmt. Das Quellen konnte dadurch um 60% vermindert werden, allerdings war diese Einwirkung mit einem erheblichen Masse- und Volumenverlust verbunden, der eine erhebliche Abnahme der Härte, Biegefestigkeit und Zähigkeit zur Folge hatte. Nach Abschluss weiterer Untersuchungen ließen sich STAMM und HANSEN (1946) bereits 1946 das Produkt „staywood“ patentieren und platzierten es auf dem Markt. RUNKEL (1951) sowie RUNKEL und WILKE (1951 und 1953) beschäftigten sich vor allem mit den chemischen Vorgängen bei der thermischen Modifizierung, den Reaktionsprodukten und der Beziehung zwischen chemischen Veränderungen und physikalischen bzw. mechanisch-technologischen Eigenschaften. Auch SANDERMANN und AUGUSTIN (1963a, b; 1964) untersuchten den Abbau der verschiedenen Holzsubstanzen unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen der thermischen Behandlung. BURO (1954) beschäftigte sich als einer der ersten mit dem Einfluss der Hitzebehandlung auf die Pilzresistenz. Er untersuchte dazu darrtrockenes Kiefern- und Buchenholz, welches er einer thermischen Behandlung bei 125 – 250°C und einem Zeitraum von 1-4 Stunden unter Luft- bzw. Stickstoffatmosphäre unterzog. Als Ergebnis stellte er, neben einer geringeren Ausgleichsfeuchte – welche die Befallswahrscheinlichkeit reduzierte, die Bildung geringer Mengen toxischer Stoffe (Teere, Formaldehyd) fest, welche zusätzlich dazu führen, dass die Holzsubstanz für Pilze nicht mehr zu verwerten ist.

In Deutschland begannen intensivere und systematische Untersuchungen zum Einfluss von Temperaturen bis 200°C auf die Holzeigenschaften (für die Holztechnik besonders wichtiger Temperaturbereich) in den 1960er Jahren. So untersuchten zum Beispiel Ko, SCHNEIDER, SACHS und FENGEL ab 1963 die Veränderung der Gewichte, Dichten und Dimensionsstabilität von Holz welches im Trockenzustand unter Luftzutritt erhitzt wurde. In den 1970er Jahren folgten Untersuchungen zu ausgewählten Festigkeitseigenschaften (SCHNEIDER 1971). KOLLMANN et al. (1969) untersuchten die Veränderung des Gefüges und der Feinstruktur von thermisch modifiziertem Holz und stellten fest, dass 120°C eine kritische Behandlungstemperatur ist. Bei dieser Temperatur fangen die Polysaccharide deutlich an sich zu wandeln, wohingegen Lignin erst bei einer Temperatur von 180°C bemerkbare Reaktionen zeigt. BURMESTER führte Anfang der 1970er Jahre erste Untersuchungen an Hölzern durch, die er

mit einem Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren behandelte. Dabei setzte er halbtrockene Hölzer in einem Autoklaven bei 5-10 bar Temperaturen zwischen 120°C und 180°C aus und erreichte dadurch eine erhebliche Verminderung des Quell- und Schwindverhaltens der untersuchten Hölzer. Er stellte fest, dass die Vergütungsergebnisse gleich gut und oft sogar besser als die anderer Modifizierungsverfahren waren. In den folgenden Jahren nahm er weitere Untersuchungen zu diesem Verfahren vor, prüfte die technische Durchführung und stellte Studien zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens an (1974 a, b; 1975; 1976). Beruhend auf den Forschungen von BURMESTER (1973, 1974 a, b) führte GIEBELER (1983) weitere Studien zum FWD-Verfahren zu den Punkten Verfahrenstechnik, Holzabbau und Vergütung, Eigenschaften der modifizierten Hölzer, Anwendungstechnik und Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit durch. Er legte dar, dass dieses Verfahren wirtschaftlich nutzbar und kostentechnisch bzw. wirtschaftlich vertretbar ist. Einen neuen Ansatz der thermischen Vergütung untersuchten SAILER et al. zwischen 1999 und 2000. Sie führten eine Hitzebehandlung von Fichten- und Kiefernholz in einem Öl-Bad bei Temperaturen zwischen 180 und 220°C und einer Dauer von 4-5 Stunden durch. Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften, dem Quell- und Schwindverhalten sowie der Resistenz gegen Pilze der auf diese Weise behandelten Hölzer zeigten durchgehend bessere Resultate als die Hölzer die parallel einer Hitzebehandlung unter Luftatmosphäre ausgesetzt worden waren.

All diese Versuche und Untersuchungen führten im Laufe der Zeit zur Entwicklung verschiedener Verfahren, die unterschiedliche Ansätze zur thermischen Modifizierung verwenden. Ziel bei der Entwicklung dieser Verfahren war es, eine größtmögliche Verminderung der Hygroskopizität sowie des Quell- und Schwindverhaltens bei gleichzeitig möglichst geringer Reduzierung der Festigkeitseigenschaften zu erreichen. Für derartig behandelte Hölzer wurde sich ein stark erweitertes Einsatzspektrum erhofft. Im folgenden Kapitel werden industrielle Verfahren vorgestellt, die bereits am Markt etabliert sind. Darüber hinaus werden ausgesuchte Ergebnisse von thermisch behandelten Hölzern, die nach den jeweiligen Verfahren behandelt wurden, vorgestellt.

1.4.2 Verfahren der thermischen Modifikation – ein Überblick

In den letzten Jahren wurden verschiedene Technologien zur Herstellung von thermisch modifizierten Hölzern entwickelt. Die heute gebräuchlichen Verfahren zur Hitzebehandlung unterscheiden sich in ihren Prozessparametern zum Teil erheblich. Hinsichtlich des Behandlungsmediums lassen sich folgende Verfahren unterscheiden: Luft, Wasserdampf, Inertgas und Pflanzenöl. Weitere Differenzierungen können hinsichtlich der Prozessparameter Druck und Temperatur gemacht werden. Folgende vier Technologien haben sich etabliert:

1. Wasserdampf – Verfahren

In diesem mehrstufigen Verfahren wird frisches oder getrocknetes Holz in einer geschlossenen Kammer (ähnlich einer Trockenkammer) zunächst in einer Aufheizphase auf nahezu Null Prozent Feuchte heruntergetrocknet. Anschließend wird Wasserdampf eingeblasen, der die verbliebene Umgebungsluft und damit den Sauerstoff weitgehend verdrängt, wodurch das Holz bei den nachfolgenden hohen Prozesstemperaturen vor Entzündung geschützt und die chemischen Veränderungen im Holz beeinflusst werden. Während der eigentlichen Wärmebehandlung wird die Temperatur auf 185°C bis 215°C erhöht. Diese

Temperatur wird einige Stunden unverändert gehalten. In der letzten Phase erfolgt die Abkühlung des Holzes mit Hilfe von Wasserzugabe. Nach einer ausreichenden Abkühlung erfolgt die Wiederbefeuchtung des Holzes, um den Feuchtigkeitsgehalt des Holzes auf die im Gebrauch geforderte Holzfeuchte (meist 4 – 7%) zu stabilisieren. Die Gesamtdauer der Behandlung beträgt in der Regel eineinhalb bis zwei Tage (MAYES und OKSANEN, 2002).

2. Öl-Hitze-Verfahren

Beim einstufigen Öl-Hitze-Verfahren wird getrocknetes Holz (Holzfeuchte ca. 12%) in pflanzliches Öl eingetaucht und darin erhitzt. Durch das Öl als wärmeübertragendes Medium wird ein vollständiger Sauerstoffausschluss erreicht und es erfolgt eine gleichmäßigere und schonende Temperaturübertragung auf das Holz. Die Erhitzung des Holzes erfolgt im Ölbad auf Temperaturen zwischen 150°C bis 220°C. Die Gesamtdauer des Prozesses beträgt 23 – 30 Stunden (u.a. GROSSMANN, 2002; PÖHLER-ROTACH und Seubert-HUNZIKER, 2002).

3. Inertgas-Verfahren

Beim mehrstufigen Inertgas-Verfahren (auch Retifikation) wird trockenes Holz (Holzfeuchte ca. 12%) in einer stickstoffhaltigen Gasatmosphäre erhitzt. Durch die Einleitung von Stickstoff wird der das Holz umgebende Luftsauerstoff nahezu vollständig verdrängt und das Entzünden des Holzes somit verhindert. Beim Inertgas-Verfahren handelt es sich um ein rein thermisches Verfahren, d.h. es erfolgt keine Wärmeübertragung mit Hilfe von Wasserdampf oder Öl. In der stickstoffhaltigen Atmosphäre wird das Holz zunächst auf Temperaturen von 160 – 180°C erhitzt, bis es völlig trocken ist. Anschließend erfolgt die Erhöhung der Temperatur auf bis zu 240°C. Die Abkühlung erfolgt durch Besprenklung mit Wasser. Die Dauer des eigentlichen Behandlungsschrittes, d.h. des Schrittes zwischen der Trocknungsphase und der Abkühlung, variiert je nach Holzart und zu erreichender Temperatur und kann zwischen 0,5 und 4 Stunden betragen (u.a. GROSSMANN, 2002; PÖHLER-ROTACH und SEUBERT-HUNZIKER, 2002).

4. Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren

Die Wirkung einer Feuchte-Wärme-Druck-(FWD) Behandlung auf die Quell- und Schwindeigenschaften beschrieb BURMESTER (1973, 1974) bereits vor vielen Jahren. Ein Beispiel für die heutige kommerzielle Anwendung der FWD-Behandlung ist das Plato-Verfahren. Bei diesem mehrstufigen Feuchte – Wärme – Druck – Verfahren wird frisches Holz zunächst in einem Wasserbad unter hohem Druck auf 150 – 180°C erhitzt, dann in einer herkömmlichen industriellen Trockenkammer dampfgetrocknet und anschließend unter trockenen Bedingungen noch einmal auf 150°C bis 190°C erhitzt. In einem letzten Schritt wird der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes wieder auf das für den Gebrauch erforderliche Niveau erhöht. Die Behandlung im Wasserbad verhindert den Kontakt mit dem Luftsauerstoff und dient als Medium zur Wärmeübertragung. Der eingesetzte Druck dient zum einen einer gleichmäßigen Behandlung des Holzes (ein Temperaturgefälle von der Holzoberfläche zum Holzinneren wird verhindert) und zum anderen resultiert daraus ein beschleunigter Prozess. Die Gesamtdauer der Behandlung beträgt 3-4 Tage (u.a. BURMESTER, 1973; PATZELT ET AL., 2002).

Das untersuchte WTT-Verfahren

Bei dem durch die dänische Firma Wood Treatment Technology (WTT) entwickelten Verfahren zur thermischen Modifizierung von Holz handelt es sich um ein FWD-Verfahren. Die Ausgangsfeuchte des eingesetzten Holzes beträgt im Gegensatz zum Plato-Verfahren zwischen 10% und 14%, d.h. das Holz wird vorher in Trockenkammern heruntergetrocknet. Das Holz wird dann in einem Behälter unter Sauerstoffabschluss mit Dampf und unter hohem Druck (bis zu 8 bar) bei Temperaturen zwischen 130°C und 180°C thermisch behandelt. Die gesamte Behandlungsdauer (ohne vorherige Trocknung) beträgt zwischen 30 und 40 Stunden, in Abhängigkeit von Holzart, Abmessungen des Holzes und der gewünschten Farbgebung.

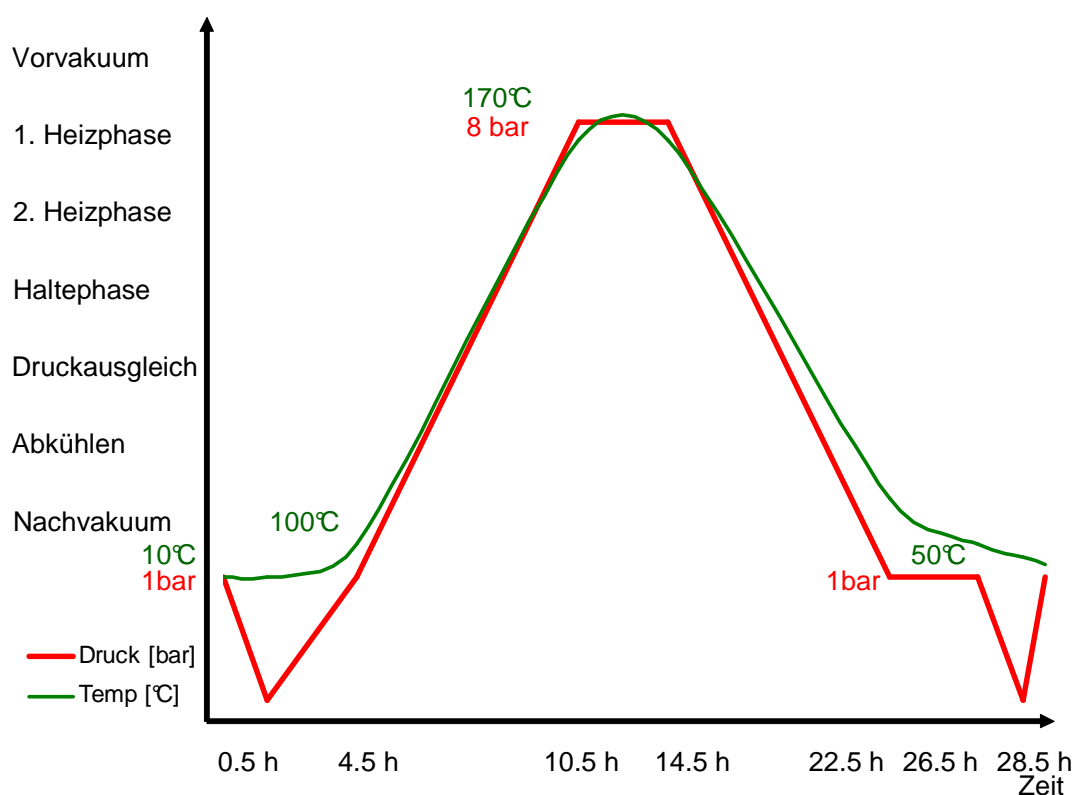


Abbildung 1: Beispielhafter Verfahrensablauf der thermischen Behandlung in einer WTT-Anlage

Im Vergleich zu andere etablierte Behandlungsverfahren (PLATO INTERNATIONAL BV, 2002; STELLAC OY, 2007; RAPP und SAILER, 2001; VERNOS, 2001) sind nach Herstellerangaben die in Tabelle 3 aufgeführten verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Merkmale für das WTT-Verfahren kennzeichnend.

Tabelle 3: Verfahrenstechnische und wirtschaftliche Unterschiede des WTT-Verfahrens im Vergleich zu anderen Verfahren der thermischen Behandlung von Holz

Alternativverfahren	WTT-Verfahren
Wasserdampf-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> - Geringere Investitionskosten - Kein Temperaturgefälle zwischen Holzoberfläche und Holzkern (Kesseltemperatur entspricht weitestgehend der Temperatur im Holzinernen). In keiner Phase findet eine Darrtrocknung des Holzes bis auf 0% statt (geringere Gefahr der Rissbildung)
Inertgas-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> - Keine zusätzlichen Stoffe notwendig (Stickstoff) - Geringere Investitionskosten - Kein Temperaturgefälle → keine Darrtrocknung des Holzes bis auf 0%
Öl-Hitze-Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> - Keine zusätzlichen Stoffe notwendig (Pflanzenöl) - Kein Anfall zusätzlicher „Abfallstoffe“ (Entsorgung des Pflanzenöls und darin gelöster Harze etc.) - Geringere Investitionskosten
Plato-Verfahren (andere FWD-Verfahren)	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Kläranlage bzw. Abwasserbehandlung notwendig (geringere Betriebskosten) - Deutlich geringerer Zeitaufwand/kürzere Behandlungsdauer (geringere Betriebskosten) - Deutlich geringere Investitionskosten (Kosten für eine WTT-Anlage liegen im Bereich der Kosten für eine normale Vakuum-Trockenkammer)

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte vorrangig projektintern zwischen den beiden wissenschaftlichen Einrichtungen der Universität Freiburg und den Praxispartnern ETS Röthlisberger SA und WTT A/S. Im Laufe des Projekts wurde mit der niederländischen Firma Willems Houtdroogbedrijf BV ein weiterer Partner als assoziierter Partner in das Projekt involviert. Die Firma Willems Houtdroogbedrijf BV erhielt während der Projektlaufzeit eine zweite Pilotanlage des dänischen Anlagenherstellers WTT A/S, beteiligte sich an den theoretischen Überlegungen und den praktischen Arbeiten zur Prozessoptimierung sowie partizipierte an den Projektergebnissen. Darüber hinaus erfolgte ein Erfahrungsaustausch mit dem Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH (IHD). Das IHD Dresden stellte zudem einen Prüfpilz für die Untersuchungen zur natürlichen Dauerhaftigkeit zur Verfügung.

2 Angewandte Methoden

2.1 Herkunft und Vorbereitung des Materials

Für alle experimentellen Untersuchungen wurden 30-45 mm starke und mind. 2,30 m lange Bohlen der Holzarten Buche (*Fagus sylvatica* L.), Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Eiche (*Quercus spec.*), Fichte (*Picea abies*), Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Weißtanne (*Abies alba*) gemäß DIN 350-1 aus drei Stämmen, jeweils aus dem Splint- und Kernbereich gewonnen. Die Hölzer stammten mit Ausnahme der Eiche (Frankreich, Haute-Saône) aus der Schweiz (Kanton Jura) aus Höhen zwischen 400-600 MüM. Für die Tanne konnten keine genauen Angaben zur Herkunft ermittelt werden. Jede Bohle wurde nach der technischen Trocknung auf 10 bis 12 % (Frischlufte-Abluft Trocknung bei 60-62°C) entsprechend der drei Untersuchungsvarianten in drei Abschnitte von je 120 cm Länge getrennt.

2.2 Hygro-thermische Modifikation

Für jeweils zwei der drei Abschnitte einer Bohle erfolgte die hygro-thermische Behandlung bei 160 bzw. 180°C. (siehe auch Abbildung 2). Dabei wurden die Abschnitte aller untersuchten Holzarten und Untersuchungsvariante gleichzeitig behandelt. Eine holzartenspezifische Behandlung wurde aufgrund technischer und wirtschaftlicher Überlegungen für das Untersuchungsmaterial verworfen. Diesbezügliche Qualitätsminderungen bei einigen schwer zu behandelnden Holzarten wie beispielsweise Eichenholz, wurden dabei bewusst in Kauf genommen.

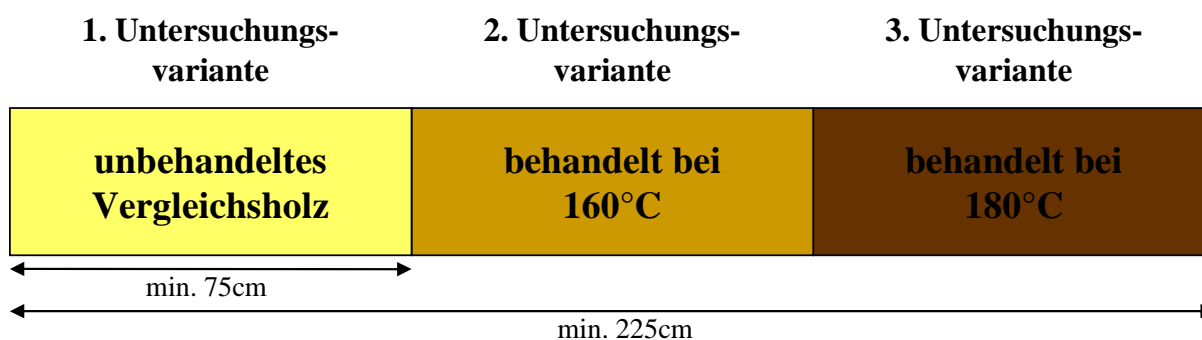


Abbildung 2: Aufteilung der Ausgangsbohlen in Untersuchungsvarianten

2.3 Wahl des Prüfverfahrens und Ausformung der Prüfkörper

Die verstärkte kommerzielle Nutzung thermischer Holzmodifikationsverfahren in den letzten Jahren machte die Einführung normativer Regelungen zur Definition und Eigenschaftsprüfung von derart behandeltem Holz notwendig. Dies wurde umgesetzt in der Erarbeitung der Vornorm CEN/TS 15679:2007 „*Thermisch modifiziertes Holz - Definitionen und Eigenschaften*“. Diese Vornorm definiert unter anderem die anzuwendenden Prüfverfahren zur Prüfung

der Holzeigenschaften, welche im Rahmen dieses Vorhabens entsprechend Anwendung fanden.

Die Herstellung der fehlerfreien Prüfkörper (PK) erfolgte am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft unter Berücksichtigung der jeweiligen europäischen bzw. DIN-Normen. Bei Eiche konnten nicht für alle Untersuchungsvarianten eine ausreichende Anzahl an Prüfkörpern gewonnen werden, da zwei Bohlen des Probenmaterials der 180°C-Untersuchungsvariante nach der Behandlung eine derart brüchige Konsistenz aufwiesen, dass die Proben schon bei der Herstellung zerbrachen. Somit konnten nur aus einer der Bohlen der 180°C-Untersuchungsvariante der Eiche PK hergestellt werden. Des Weiteren wies eine Bohle des mit 160°C behandelten Kiefernholzes starke Risse auf.

2.4 Holztechnologische Untersuchungen

2.4.1 Physikalische Holzeigenschaften

Vom partiellen Abbau der Holzsubstanz infolge thermischer Behandlung ist nach bisherigem Kenntnisstand vor allem die Hemicellulose betroffen. Dies führt zu einer Verringerung von frei verfügbaren Hydroxylgruppen, die wesentlich für die Wasserbindung im Holz verantwortlich sind. Dies bedeutet, dass das behandelte Holz bei gleicher Umgebungsfeuchte weniger Feuchtigkeit aufnimmt als unbehandeltes Vergleichsholz. Als Kennwerte der veränderten hygroskopischen Eigenschaften wurden das Sorptionsvermögen und die Dimensionsstabilität (auf Basis der Quell- und Schwindkennwerte) untersucht. Die Untersuchungen erfolgten an fehlerfreien PK gemäß der in Tabelle 4 aufgeführten Normen.

Tabelle 4: Durchgeführte Versuche zu den Quell- und Schwindeigenschaften sowie zum Sorptionsvermögen – minimal verwendeten Prüfkörperanzahl je Baumart, Stamm, Stammzone und Untersuchungsvariante

Versuch	Norm	Abmaße	Anzahl
Quell- und Schwindeigenschaften	DIN 52184	20x20x10mm	15
Sorptionsvermögen	EN ISO 12571	20x20x60mm	15

Zur Ermittlung der Quell- und Schwindwerte wurde das Klima in drei Stufen variiert – zur Ermittlung des Sorptionsvermögens in fünf Stufen. Das Sorptionsvermögen wurde in diesen Stufen sowohl für die Adsorption (bei steigender Luftfeuchtigkeit) als auch für die Desorption (bei fallender Luftfeuchtigkeit) ermittelt (Tabelle 5). Nach Erreichen der Gewichtskonstanz in den jeweiligen Klimaten wurden die PK gewogen und mit einem Messschieber auf 0,01 mm genau vermessen. Eine Änderung der Dimensionsstabilität in Folge thermischer Behandlung kann mit Hilfe des Anti-Swell-Efficiency-Index (ASE-Index) bewertet werden. Der ASE-Index ist die Differenz der Quellungskoeffizienten behandelter und unbehandelter Proben und wird zwischen dem darrtrockenen Zustand und der maximalen Quellung oder zwischen verschiedenen hygroskopischen Feuchtebereichen bestimmt (LUKOWSKY 1999). Der ASE-Index wurde in dieser Arbeit für die gleichen PK berechnet, die für die Bestimmung der Quell- und Schwindeigenschaften verwendet wurden.

Tabelle 5 Klimastufen (Temperatur und relative Luftfeuchte) der durchgeführten Untersuchungen

Versuch	Messreihenfolge	Temperatur [°C]	Luftfeuchte φ_F [%]
Quell- und Schwindeigenschaften	1	20 ± 2	65 ± 5
	2	20 ± 2	35 ± 5
	3	20 ± 2	85 ± 5
Sorptionsvermögen	Adsorption	Desorption	
	1	5	23 ± 2
	2	4	23 ± 2
	3	3	23 ± 2
	4	2	23 ± 2
	5	1	23 ± 2
			30 ± 5
			50 ± 5
			65 ± 5
			80 ± 5
			90 ± 5

Den ASE-Berechnungen über die Querschnittsfläche lagen folgende Formeln zugrunde:

$$\alpha_A = \frac{A_f - A_o}{A_o} \quad ; \alpha_A = \text{max. Flächen-Quellmaß} \quad (1)$$

$$ASE = \frac{(\alpha_k - \alpha_p)}{\alpha_k} \cdot 100 \text{ [%]} \quad ; ASE = \text{Anti-Swell-Efficiency [%]} \quad (2)$$

; A_f = Querschnittsfläche der Probe [mm²], maximal gequollen
 ; A_o = Querschnittsfläche der Probe [mm²], gedarrt
 ; α_k = max. Quellmaß der unbehandelten Proben
 ; α_p = max. Quellmaß der behandelten Proben

Ein ASE-Index von 0% gibt an, dass das vergütete Holz das gleiche maximale Quellmaß wie das unbehandelte Holz aufweist. Ein Wert von 100% bedeutet dagegen, dass keine Quellung des behandelten Materials aufgetreten ist, d.h. dass das Holz völlig dimensionsstabil ist. Ein hoher ASE-Index weist somit auf ein hohes Maß der Vergütung hin.

2.4.2 Mechanische Holzeigenschaften

Um den Grad der Veränderung der Festigkeitseigenschaften der behandelten Hölzer beurteilen zu können, wurden Untersuchungen zum Masseverlust, zur Brinell-Härte, zur Biegefestigkeit und Biege-E-Modul sowie zur Bruchschlagarbeit an, im Normalklima konditionierten, fehlerfreien PK gemäß der in Tabelle 6 aufgeführten Normen durchgeführt. Für alle Prüfun-

Tabelle 6: Übersicht zu den durchgeführten Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften mit den Abmaßen und der Prüfkörperanzahl (Prüfpunkte) je Baumart und Untersuchungsvariante

Versuch	Norm	Abmaße	Anzahl der PK bzw. PP
Dichte	DIN 52182	50x20x20 mm	10
Brinell-Härte	DIN 1534	35x100x50 mm	20
Biegefestigkeit	DIN 52186	20x20x360 mm	10
E-Modul	DIN 52186	20x20x360 mm	10
Bruchschlagarbeit	DIN 52189	20x20x300 mm	10

gen wurden eine Mindest-PK-Anzahl von 10 bzw. Mindest-Prüfpunkt (PP)-Anzahl von 20 bei der Ermittlung der Brinell-Härte angestrebt und bis auf wenige Ausnahmen erreicht.

2.4.2.1 Brinell-Härte

Die Ermittlung der Brinell-Härte (H_B), der Biegefestigkeit und des Biege-E-Modul erfolgte auf einer Prüfmaschine der Firma Zwick. Die Brinell-Härte wurde auf den Hirnflächen der Holzproben abweichend von der Norm, nicht über den Durchmesser des Abdrucks, sondern über die Eindringtiefe der Stahlkugel ermittelt (Abbildung 3). Die Berechnung erfolgte in Anlehnung an SONDEREGGER und NIEMZ (2001) nach folgender Formel:

$$H_B = \frac{F}{D * \pi * h} \quad \begin{array}{l} ;F = \text{Nominalkraft in Newton,} \\ ;D = \text{Kugeldurchmesser in Millimeter,} \\ ;h = \text{Eindringtiefe} \end{array} \quad (3)$$

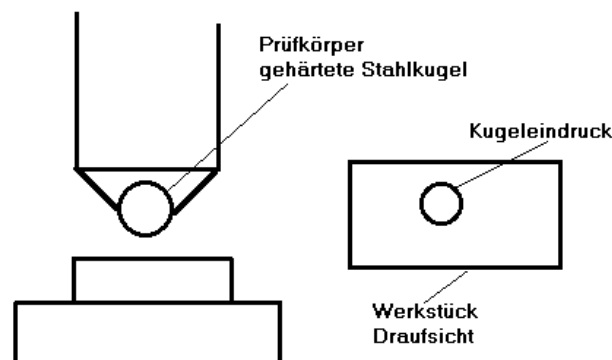


Abbildung 3: Ermittlung der Brinell-Härte über die Eindringtiefe der Stahlkugel in die Probe

2.4.2.2 Bruchschlagarbeit

Die Bruchschlagarbeit (ω) ist eine Größe über die Widerstandsfähigkeit von Holzproben gegenüber dynamischer Krafteinwirkung – ausgedrückt als Schlagbiegefestigkeit. Die Schlagbiegefestigkeit ist die von der Holzprobe aufgenommene Arbeit (Joule), bezogen auf den Querschnitt des Probekörpers. Die Prüfung erfolgte nach Lagerung der Proben im Normalklima. Der Versuch wurde mit einem Pendelschlagwerk der Firma Hahn und Kolb durchgeführt. Die Bruchschlagarbeit errechnet sich wie folgt:

$$\omega = \frac{1000 * W}{b * h} [kJ / m^2] \quad \begin{array}{l} ; \omega = \text{Bruchschlagarbeit des Holzes in kJ/m}^2, \\ ; W = \text{Arbeit zum Durchschlagen der Probe} \\ ; b \text{ und } h = \text{Querschnittsmaße der Probe} \end{array} \quad (4)$$

2.4.2.3 Biege-E-Modul und Biegefestigkeit

Der Biege-Elastizitätsmodul (E_B) ist eine Kenngröße für die Verformungssteifigkeit von Holzproben im elastischen Bereich. Der Biege-Elastizitätsmodul wird bestimmt aus der elastischen Durchbiegung der Probe und errechnet sich nach DIN 52186 wie folgt:

$$E_B = \frac{l^3}{4 * b * h^3} * \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad (5)$$

E_B Biege-E-Modul in N/mm²,
 b und h = Querschnittsmaße der Probe
 l = Stützweite in mm,
 ΔF = beliebige Kraftdifferenz in N im elastischen Verformungsbereich,
 Δf = die der Kraftdifferenz ΔF entsprechende Durchbiegung in Probenmitte

Die Biegefestigkeit β_B ist die bis zum Bruch der Probe auftretende größte rechnerische Biegespannung in N/mm². In Abbildung 4 ist die Versuchsanordnung zur Ermittlung des E-Moduls und der Biegefestigkeit dargestellt.

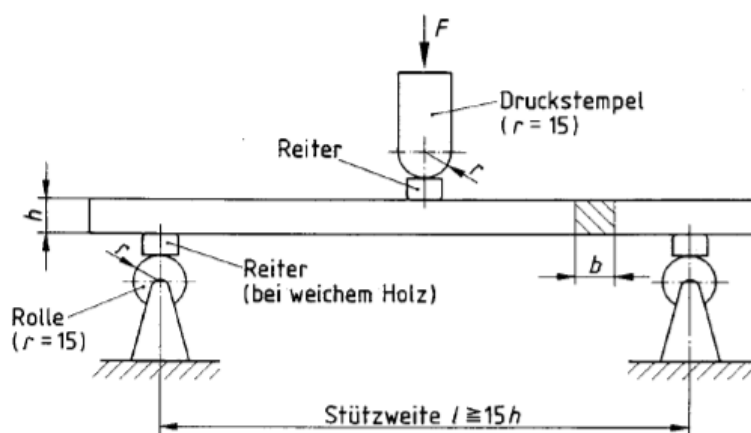


Abbildung 4: Versuchsanordnung zur Prüfung des Biege-E-Moduls und der Biegefestigkeit nach DIN 52186.

2.5 Holzbiologische Untersuchungen

2.5.1 Allgemeines

Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Hölzern sind abhängig vom beabsichtigten Verwendungsbereich. Die Prüfung und die Bewertung der Dauerhaftigkeit von Holz ist anhand EN 350-1 vorzunehmen. Nach dieser Norm sind zur Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz sowohl Laborversuche als auch Freilandversuche zugelassen. Freilandversuche laufen unter realistischen Klima- und Umweltverhältnissen ab. Allerdings können wichtige Einflussfaktoren über die lange Versuchsdauer von mehreren Jahren unkontrolliert (Witterung) variieren und sind zudem nicht wiederholbar. Zur zeitnahen Einschätzung der Wirksamkeit der hygro-thermischen Behandlung mit dem WTT-Verfahren auf die natürliche Dauerhaftigkeit wurden für diese Arbeit Laborversuche gewählt.

Für die nach dem WTT-Verfahren behandelten Hölzer wird angestrebt, dass die daraus hergestellten Produkte in den Gebrauchsklassen 3 und 4 eingesetzt werden können (Tabelle 7). Als Entscheidungshilfe können zur Beurteilung der natürlichen Dauerhaftigkeit holzbiologische Laborversuche nach EN 113 und ENV 807 herangezogen werden. Diese Prüfverfahren der

Tabelle 7: Gebrauchsklassen nach DIN 335-1

GBK	Allgemeine Gebrauchsbedingungen	Exposition gegenüber Befeuchtung während des Gebrauchs
1	ohne Erdkontakt, abgedeckt	innen, trocken max. 20%
2	ohne Erdkontakt, abgedeckt	innen, gelegentlich > 20%
3	der freien Bewitterung ausgesetzt, aber ohne Erdkontakt	
3.1	ohne Erdkontakt, geschützt	außen, gelegentlich > 20%
3.2	ohne Erdkontakt, ungeschützt	außen, häufig > 20%
4	der freien Bewitterung ausgesetzt, und mit Erd- oder Süßwasserkontakt	
4.1	in Kontakt mit Erde	außen, vorwiegend > 20%
4.2	in Kontakt mit Erde – hohe Beanspruchung	außen, ständig feucht > 20%

GBK = Gebrauchsklasse

natürlichen Dauerhaftigkeit befinden sich seit einigen Jahren in einem Überarbeitungsprozess, in dessen Folge die Technischen Spezifikationen (TS) CEN/TS 15083-1 (Prüfverfahren Basidiomyceten) und CEN/TS 15083-2 (Prüfverfahren Moderfäulepilze) als Vornormen veröffentlicht wurden (vgl. mit Tabelle 8). Bis zur Umwandlung der TS in den Status einer europäischen Norm, können nationale Norm weiterhin parallel angewendet werden. Für die vorliegende Arbeit wurden die holzbiologischen Versuche sowohl nach der EN 113 bzw. ENV 807 als auch nach den beiden TS durchgeführt.

2.5.2 Versuchsübergreifende Vorbereitungen

2.5.2.1 Prüfkörperherstellung

Es wurde für jede Prüfvariante (Holzart, Stammzone (Kern-/Splintzone), Untersuchungsvariante, Versuchsdauer) eine Mindestanzahl von 10 PK angestrebt. Diese angestrebte Anzahl wurde regelmäßig weit überschritten, aber in wenigen Fällen aufgrund unbefriedigender Materialqualität auch nicht erreicht. Beispielsweise wies das Probenmaterial des bei 180°C behandelten Eichenholzes eine derart brüchige Konsistenz auf, dass nur eine eingeschränkte Prüfkörperzahl ausgeformt werden konnte. Ähnliche Probleme waren auch beim Kiefernholz

Tabelle 8: Verwendete Normen und Prüfkörpermaße

Bezeichnung	Status / Gültigkeit	Titel der Norm / Prüfgegenstand	PK-Maße l x b x h [mm]
CEN/TS 15083-1: 2005-07	Vornorm / bis 7/2008	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen Holz zerstörende Pilze, Prüfverfahren – Teil 1: Basidiomyceten	50 x 25 x 15
EN 113: 1996-11	Norm	Holzschutzmittel – Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen Holz zerstörende Basidiomyceten – Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit	
CEN/TS 15083-2: 2005-11	Vornorm / bis 11/2008	Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen Holz zerstörende Pilze, Prüfverfahren – Teil 2: Moderfäulepilze	100 x 10 x 5
ENV 807: 2001-05	Vornorm / bis 05/2004	Holzschutzmittel – Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen	

sowohl bei der 160°C- als auch bei einer bei 180°C-Variante behandelten Bohle festzustellen.

In Vorbereitung der PK-Herstellung wurden aus den Bohlen Stäbe hergestellt, die im Vergleich zu den angestrebten PK-Maßen ein Übermaß aufwiesen. Anschließend wurden diese Stäbe nach mehrwöchiger Konditionierung im Normalklima (20°C / 65 % RH) auf die jeweiligen Prüfmaße (vgl. Tabelle 8) reduziert und die PK ausgeformt. Das Volumen der PK wurde dann normgerecht einheitlich mit 5,00 cm³ (ENV 807) bzw. 18,75 cm³ (EN 113) angenommen.

2.5.2.2 Prüfkörperarten

Zur Durchführung des Versuchs wurden verschiedene PK-Arten unterschieden. Die natürliche Dauerhaftigkeit von Versuchshölzern wird durch die Gegenüberstellung der pilzbedingten Masse- bzw. MOE-Verluste mit den Werten von so genannten Bezugsholz-PK ermittelt. Als Bezugsholzarten dient in der Regel Buchenholz für Laubhölzer und Kiefernspiltholz für Nadelhölzer. Neben den Bezugsholz- und Normal-PK, an denen der Masseverlust zur Ermittlung der natürlichen Dauerhaftigkeit bestimmt wurde, dienten weitere PK der Bestimmung der Virulenz und Holzfeuchtigkeit sowie der Ermittlung von Korrekturfaktoren. Die PK-Arten wurden zur fortlaufenden Identifikation während des Versuchs codiert (Tabelle 9).

Tabelle 9: Differenzierung der untersuchten Prüfkörperarten (PK-Arten)

Typ	Bezeichnung	Art und Zweckbestimmung	Code
nicht thermisch behandelt	Virulenz-PK ¹	dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. dem Agarnährboden ausgesetzte PK zur Überwachung der Virulenz	V
	Feuchte-PK	Überwachung des für ein optimales Pilzwachstum erford. Holzfeuchtegehalt s	F
	Kontroll-PK	nicht dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. Agarnährboden ausgesetzt Veränderungen der Masse dieser Prüfkörper dienen der Ermittlung der Korrekturfaktoren nach EN 113 bzw. ENV 807	K
	Bezugsholz-PK ²	dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. dem Agarnährboden ausgesetzte PK	B
	Vergleichs-PK ¹	dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. dem Agarnährboden ausgesetzte PK	B
	Normal-PK	dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. dem Agarnährboden ausgesetzte PK	N
thermisch behandelt	Feuchte-PK	Überwachung des für ein optimales Pilzwachstum erford. Holzfeuchtegehalt s	F
	Kontroll-PK	nicht dem Pilzangriff im Erdesubstrat bzw. Agarnährboden ausgesetzt diese PK dienen der Ermittlung der Korrekturfaktoren (EN 113 bzw. ENV 807)	K
	Normal-PK	dem Pilzangriff im Erde-Substrat bzw. auf dem Agarnährbodens ausgesetzt	N

¹ nur ENV 807 bzw. EN 113; ² nur CEN/TS15083-1 und 2

2.5.2.3 Auswaschung der Prüfkörper

Vor biologischen Prüfungen werden nach der Vornorm CEN/TS 15679 für thermisch modifizierte Hölzer eine Auswaschbeanspruchung nach EN 84 bzw. eine Bewitterung nach prCEN/TS 15397 empfohlen. In dieser Studie erfolgte eine Auswaschung nach EN 84. Dazu wurden die Prüfkörper für 20 Minuten, getrennt nach Holzart und Untersuchungsvarianten, in einen evakuierbaren Exsikkator in Wasser der Qualität 3 nach EN ISO 3696 unter einem Vakuum von 4 kPa getränkt. Nach Wiederherstellung des Atmosphärendrucks wurden die Prüfkörper weitere 2 Stunden im Wasser belassen, bevor das Wasser erneuert wurde. Während der anschließenden 14-tägigen Wasserlagerung wurde das Wasser insgesamt 9-mal (nach dem

ersten und zweiten Tag sowie anschließend alle zwei Tage) gewechselt. Im Falle der Prüfkörper für die Agarblocktests folgte dieser Wässerung eine schonende Trocknung im Normklima ($20\pm 2^\circ\text{C}$ und $65\pm 5\%$ RH) bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz. Die Prüfkörper der Erdkontaktversuche wurden bereits nach Erreichen eines Holzfeuchtegehalts von etwa 50 % dem Wärmeschrank entnommen und in das Erdesubstrat verbracht.

2.5.2.4 Messdatenermittlung

Während der Versuchsdurchführung wurden je nach Verfahrensschritt mehrere Messdaten erhoben, die in Tabelle 10 zusammengefasst sind. Alle Gewichtsdaten wurden auf 0,001 g genau ermittelt.

Die Darmmassenermittlung erfolgte im Anschluss an eine bei 103°C durchgeführte Darrtrocknung und der anschließenden Abkühlung der Prüfkörper in einem Exsikkator. Nach Abschluss der Versuche und der Entnahme der Prüfkörper aus den Versuchsflaschen bzw. den Versuchsbeeten wurde anhaftendes Mycel und Erdpartikel sorgfältig mit einer Bürste bzw. einem Pinsel entfernt und anschließend direkt gewogen.

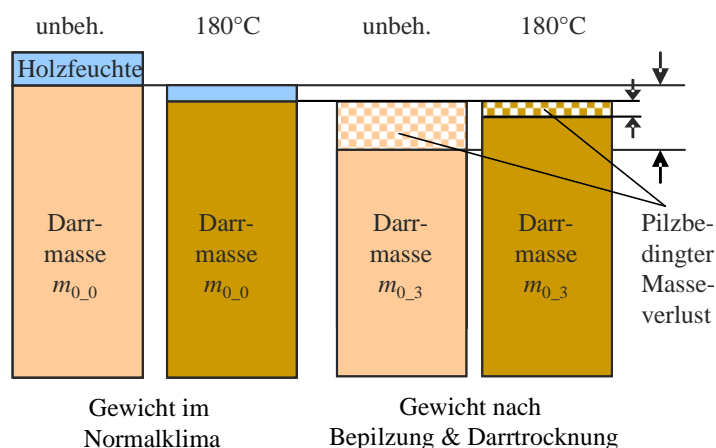


Abbildung 5: Skizzierung der Massenänderung infolge Trocknung und Pilzbefall

Die Normal-PK (die der Ermittlung der natürlichen Dauerhaftigkeit dienten) wurden vor der Inkubation nicht darrgetrocknet, da eine eventuelle Beeinträchtigung des Pilzwachstums durch vorherige Hitzeeinwirkung insbesondere bei den nicht thermisch behandelten PK vermieden werden sollte. Da die anfängliche Darmmasse eines jeden PK's für die Bestimmung des versuchsbedingten Masseverlusts benötigt wurde, erfolgte die Ermittlung einer „theoretischen“ Darmmasse durch die Verwendung des an Feuchte-PK bestimmten mittleren Feuchtigkeitsgehalts.

Im Erdkontaktversuch wurden nach CEN/TS 15083-2 für die Versuchshölzer des Nadelholzes

Tabelle 10: Messdatenermittlungen in Abhängigkeit vom Ablaufschritt des Prüfverfahrens

Verfahrensschritt	Beschreibung	Formelzeichen
vor Auswaschung	Normalmasse nach Konditionierung im Normalklima	m_{N_0}
nach Auswaschung	Normalmasse nach Auswaschung und Konditionierung im Normalklima	m_{N_1}
vor Inkubation	Masse nach Darrtrocknung (Anfangs-Darrmasse)	m_{0_0}
	statisches Elastizitätsmodul (Anfangs-MOE)	E_{0_0}
nach Inkubation	Feuchtmasse während der Versuchsdauer (nur Erdkontaktversuch)	m_{F_0}
nach Versuchsende	Feuchtmasse = von Pilz- und Erdbestandteile gereinigtes Frischmasse, kurz nach Entnahme aus dem Erdesubstrat bzw. dem Versuchscontainer	m_{F_3}
	Masse nach Darrtrocknung (End-Darrmasse)	M_{0_3}
	statisches Elastizitätsmodul (End-MOE)	E_{0_3}

vor und nach dem Versuch das statische Elastizitätsmodul (MOE) im Rahmen einer Drei-Punkt-Biegeprüfung nach DIN 52186 ermittelt. Vor der Biegeprüfung wurden die Prüfkörper unter Anwendung des Verfahrens nach EN 84 auf Fasersättigung getränkt.

2.5.3 Erdkontaktversuche

Die Erdkontaktversuche wurden in Anlehnung an ENV 807 vorbereitet und gemäß ENV 807 und CEN/TS 15083-2 ausgewertet. Die Versuchsdauer betrug 8, 16, 24, und 32 Wochen, weshalb 4 identische Serien von Parallel-PK'n angefertigt und untersucht wurden. Die jeweilige Prüfkörperanzahl ist den angehängten Prüfberichten zu entnehmen.

2.5.3.1 Verwendetes Erdesubstrat

Das für den Versuch notwendige Erdesubstrat wurde aus dem Versuchsgarten des Instituts für Baumphysiologie und Forstbotanik der Universität Freiburg bezogen. Dabei handelte es sich um natürliche Oberflächenerde, welche vor Versuchsbeginn auf ihren pH-Wert, die Wasserhaltekapazität und auf ausreichende Virulenz untersucht wurde. Das Erdesubstrat wurde mit einer Mindesttiefe von 150 mm in die Versuchsbeete gefüllt (Abbildung 6). Anschließend erfolgte die Einstellung der Wasserhaltekapazität auf 95%.

2.5.3.2 Prüfkörpereinbau

Die unterschiedlichen Holzarten wurden getrennt voneinander in die Versuchsbeete eingebracht. Die Prüfkörper innerhalb einer Holzart wurden so in die Erde eingebracht, dass auf unbehandelte Prüfkörper solche der Temperaturvariante 160°C, darauf solche der Temperaturstufe 180°C und dann wieder unbehandelte Prüfkörper folgten. Zwischen die verschiedenen Untersuchungsvarianten wurden jeweils die Feuchte- und Virulenzprüfkörper eingebracht. Die Versuchsbeete wurden derart abgedeckt, dass ein Luftaustausch zwischen den Versuchsbeeten und der Klimakammer möglich war.



Abbildung 6: Versuchsbeete des Erdkontaktversuchs in Anlehnung an ENV 807

2.5.3.3 Versuchsbedingungen

Die Versuchsbeete wurden in einer Klimakammer aufgestellt, in der das nach CEN/TS 15083-2 bzw. ENV 807 geforderte Klima von $27\pm 2^\circ\text{C}$ und $70\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte gewährleistet wurde. Innerhalb der Gesamtversuchsdauer von 32 Wochen erfolgte jeweils nach einer Dauer von 8, 16 und 24 Wochen die Entnahme einer Serie von Parallel-Prüfkörpern. Nach 16 Wochen Versuchsdauer erfolgte außerdem der Ausbau der Virulenz-Kontrollprüfkörper.

Während der gesamten Versuchsdauer erfolgte in regelmäßigen Abständen die Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts anhand der Feuchte-PK. Bei einem Holzfeuchtegehalt der Feuchte-PK von unter 50 ± 5 % wurde dem Erdesubstrat Wasser hinzugegeben. Bei Überschreitung eines Feuchtigkeitsgehalts von deutlich mehr als 80 ± 5 % wurde die auf den Versuchsbeeten aufgebrachte Abdeckung für einige Zeit abgenommen, bis der Feuchtigkeitsgehalt wieder den anvisierten Rahmen zwischen 50 und 80 % erreichte.

Die Lagerung der Kontroll-Prüfkörper zur Berechnung der Korrekturwerte (vgl. Tabelle 9) erfolgte im Normalklima über die gesamte Versuchsdauer von 32 Wochen.

2.5.3.4 Gültigkeit des Versuchs

Die Gültigkeitskriterien zur Annahme der Versuche nach ENV 807 bzw. CEN/TS-15083-2 unterscheiden sich voneinander. Während in ENV 807 ausschließlich Bezug auf die Ergebnisse der parallel zu prüfenden und vorher mit Holzschutzmittel getränkten PK nimmt, wird in CEN/TS-15083-2 die Gültigkeit des Versuchs anhand der MV der Bezugsholz-PK beurteilt.

Nach CEN/TS-15083-2 ist der Versuch gültig, wenn bei Laubhölzern nach längstens 24 Wochen die Bezugsholz-PK (Buchenholz) einen mittleren MV von mindestens 20 % aufweisen. Ist dieser Wert bereits nach 16 oder 20 Wochen erreicht, soll der Versuch entsprechend früher abgebrochen werden.

Bei Nadelhölzern muss der mittlere Abfall des statischen E-Moduls (MOE) der Bezugsholz-PK (Kiefernspiltholz) nach längsten 48 Wochen mindestens 40 % betragen. Weiterhin ist sowohl für Laub- als auch für Nadelhölzer bei den untersuchten Prüfkörpern das Vorliegen von Moderfäule mikroskopisch zu bestätigen.

2.5.3.5 Beurteilungskriterien der natürlichen Dauerhaftigkeit

Die Beurteilung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Versuchshölzern nach Erdkontaktversuchen kann nur auf Basis der Vornorm CEN/TS-15083-2 vorgenommen werden. Als Beurteilungskriterien dient ein zu berechnender x-Wert. Bei Laubhölzern wird dafür der Median-Masseverlust und bei Nadelhölzern der Abfall des statischen E-Moduls (MOE) dem Werten der Bezugshölzer gegenübergestellt. Der Masseverlust bzw. MOE-Abfall wird errechnet, indem die Werte nach der Entnahme aus dem Erdesubstrat (End-Darrmasse bzw. End-MOE) von den Werten vor der Inkubation (Anfangs-Darrmasse bzw. Anfangs-MOE) subtrahiert werden. Sowohl der Masseverlust als auch der MOE-Abfall werden als Prozentsatz der Anfangswerte angegeben.

Die Beurteilung der natürlichen Dauerhaftigkeit erfolgt anhand eines wie folgt zu ermittelnden x-Wertes:

$$x = \frac{\text{Medianwert des Masseverlustes bzw. des medianen MOE - Abfalls der Versuchsholz - PK}}{\text{Medianwert des Masseverlustes bzw. des medianen MOE - Abfalls der Bezugsholz - PK}} \quad (6)$$

Tabelle 11: Skale zur vorläufigen Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit nach Erdkontaktversuchen nach CEN/TS 15083-2

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	x-Wert
1	Sehr dauerhaft	$\leq 0,10$
2	Dauerhaft	$> 0,10$ bis $\leq 0,20$
3	Mäßig dauerhaft	$> 0,20$ bis $\leq 0,45$
4	Wenig dauerhaft	$> 0,45$ bis $\leq 0,80$
5	Nicht dauerhaft	$> 0,80$

Die natürliche Dauerhaftigkeit gegen den Angriff durch Moderfäulepilze und weitere im Boden lebende Mikroorganismen wird durch Einordnung des x-Wertes in das Bewertungsschema nach CEN/TS 15083-2 bestimmt (Tabelle 11). Da es sich hierbei um eine in ihrer Gültigkeit abgelaufene Vornorm handelt, ist die Einstufung als vorläufig anzusehen.

2.5.4 Agarblocktests zur Ermittlung der natürlichen Dauerhaftigkeit

Agarblocktests nach CEN/TS 15083-1 bzw. EN 113 wurden ebenfalls für alle sechs untersuchten Holzarten durchgeführt. Die einzelnen PK-Anzahlen je Baumart, Untersuchungsvariante, Zone und Prüfpilz sowie die Anzahlen von Virulenz- und Kontroll-PK'n sind im Anhang dieses Berichtes getrennt nach Laub- und Nadelholz zusammengestellt. Unbehandeltes Kiefern-Splintholz und Buche bildeten die Referenzholzarten. Der pilzunabhängige MV, der auf sterilen Agarnährboden platzierten Kontroll-PK, diente zur Bestimmung des Korrekturwertes nach EN 113 – die Ermittlung des MV's der Virulenz-PK zur Sicherstellung ausreichender Aggressivität der Prüfpilze.

Weiterhin wurden für die Baumarten Buche, Eiche und Kiefer zusätzliche Prüfkörper keiner Auswaschung nach EN 84 unterzogen, um den Effekt der Auswaschung auf den Masseverlust festzustellen. Dieser Zusatzversuch wurde jedoch an nur einem Prüfpilz pro Baumart durchgeführt. Der entsprechende Probenumfang ist ebenfalls im Anhang dieser Arbeit dargestellt.

2.5.4.1 Prüfpilze

Die fünf verwendeten Prüfpilze stellen die wichtigsten Holz zerstörenden Pilze dar und werden regelmäßig in Dauerhaftigkeitsversuchen verwendet. Nach CEN/TS 15083-1 ist jedoch nur noch *Coniophora puteana* obligatorisch zu verwenden. Für bestimmte Hölzer¹ sind *Coriolus versicolor* (Laubhölzer) und *Poria placenta* (Nadelhölzer) obligatorische Prüfpilze.

Bis auf *Coriolus versicolor*, der eine Weißfäule verursacht, gehören alle zur Gruppe der Braunfäuleerreger. Alle Laub- und Nadelhölzer wurden mit jeweils 4 Prüfpilzen behandelt. Drei davon wurden an allen Holzarten getestet, der jeweils vierte Prüfpilz als Spezialist für Laubholz (*Coriolus versicolor*) bzw. Nadelholz (*Poria placenta*) nur an der entsprechenden Holzartengruppe.

2.5.4.2 Versuchsvorbereitung

Die nach der Auswaschung im Normalklima (20°C, 65% relative Luftfeuchte) konditionierten

¹ Der Begriff „bestimmt“ ist in CEN/TS 15083-1 nicht näher definiert.

Tabelle 12: Verwendete Prüfpilze in den Agarblocktests nach CEN/TS 15083-1 und EN 113

Wissenschaftler Name	Deutscher Name	Stammnummer	getestet an
<i>Coniophora puteana</i>	Brauner Kellerschwamm	BAM Ebw. 15 ¹ / (DSM 3085))	LH und NH
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	Balkenblättling	BAM Ebw. 109 ³ / (DSM 3087)	LH und NH
<i>Serpula lacrymans</i>	Echter Hausschwamm	BAM Ebw. 315	LH und NH
<i>Coriolus versicolor</i>	Schmetterlingstramete	CTB 863 A ² / (DSM 3087)	LH
<i>Poria placenta</i>	Rosafarbener Saftporling	EMPA 229	NH

¹erhalten als EMPA 62, ²: erhalten als EMPA 159, ³: erhalten als EMPA 100; LH = Laubholz, NH = Nadelholz

und gewogenen Prüfkörper wurden in kleine Folienpakete eingeschweißt und mit Gamma-Strahlen sterilisiert. Weiterhin wurde zur späteren Ermittlung der Masseverluste aller Prüfkörper gemäß EN 350-1 an Feuchte-PK'n die Holzfeuchte und daraus eine „theoretische“ Anfangs-Darrmasse ermittelt.

Als Versuchsgefäße für die Agarblocktests wurden 1-Liter-Vierkantflaschen verwendet mit einem Schraubverschluss mit luftdurchlässiger Membran zur Gewährleistung der Sauerstoffzufuhr. Die Versuchsgefäße wurden mit 4 %-igem Agarboden befüllt. Nach Auskühlung wurde dieser mit dem jeweiligen Prüfpilzes (höchstens 4 Wochen alt) beimpft.

2.5.4.3 Prüfkörpereinsatz

Nachdem das Mycel die Oberfläche des Nährbodens komplett bewachsen hatte, wurden unter sterilen Bedingungen in jedes Versuchsgefäß vier zuvor sterilisierte Silikonstreifen von ca. 3 mm Dicke als Abstandhalter zwischen Nährboden und Prüfkörper eingebracht und darauf drei Prüfkörper pro Versuchsgefäß platziert: eine unbehandelte, eine 160°C – und eine 180°C behandelte Holzprobe (Abbildung 7). Die Anordnung der drei Untersuchungsvarianten innerhalb eines Versuchsgefäßes erfolgte in rotierender Reihenfolge, um eventuelle Positionseinflüsse zu minimieren. Die Prüfkörper berührten sich weder untereinander noch den Agarnährboden.



Abbildung 7: Lagerung der PK (je ein unbehandelter Kontroll-PK, ein 160°C-PK und ein 180°C-PK) auf Agarnährboden in Glascontainern zur Resistenzprüfung nach CEN/TS-15083-1 bzw. EN 113

Zur Kontrolle der Virulenz der Prüfpilze wurden zusätzliche Versuchsgefäße mit nur unbehandelten Holzproben bestückt. Für die Ermittlung des Korrekturwertes nach EN 113 wurden außerdem thermisch behandelte und unbehandelte Prüfkörper in unbeimpfte Versuchsgefäße (steriler Agarboden) eingebracht.

2.5.4.4 Versuchsbedingungen

Alle Versuchsgefäße wurden in einer Klimakammer bei $22\pm 2^\circ\text{C}$ und $70\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte 16 Wochen gelagert (Abbildung 8). Einzelne Zusatzgefäße für die Holzarten Buche, Eiche und Tanne wurden für die Dauer von 32 Wochen gelagert, beimpft mit dem für Laub- bzw. Nadelholz spezialisiertem Prüfpilz.

2.5.4.5 Prüfkörperausbau

Nach Beendigung der Prüffrist wurden die Prüfkörper aus dem Gefäß entnommen, vorsichtig von anhaftendem Mycel befreit und auf 0,01 g gewogen. Nach dem Trocknen im Trockenschrank bei 103°C für 24 Stunden wurde jeder Prüfkörper nach Abkühlung im Exsikkator erneut auf 0,01 g gewogen, um den Masseverlust durch Pilzabbau bestimmen zu können. Nach EN 113 wurde dieser um den mittleren Masseverlust der Kontroll-Prüfkörper in sterilen Versuchsgefäßen korrigiert. Nach CEN/TS 15083-1 wird diese Korrektur nicht vorgenommen.



Abbildung 8: Lagerung der Glascontainer in einer Klimakammer zur Resistenzprüfung nach CEN/TS-15083-1 bzw. EN 113

2.5.4.6 Gültigkeit des Versuchs

Da dieser Versuch nach EN 113 vorbereitet und sowohl nach EN 113 wie auch nach CEN/TS 15083-1 ausgewertet wurde, muss hinsichtlich der Gültigkeitskriterien zwischen den beiden Normen unterschieden werden. Nach CEN/TS 15083-1 und EN 113 richtet sich die Gültigkeit neben dem Ergebnis einer qualitativen Beurteilung der Prüfkörper (Mycelbewuchs) nach der Anzahl der annehmbaren² PK (mindestens 4) und dem Mindestmasseverlust³ der den jeweiligen Prüfpilzen ausgesetzten Bezugsholz-PK (Tabelle 13).

Tabelle 13: Mindestmasseverluste der Bezugsholz-PK in Abhängigkeit vom Prüfpilz nach 16 Wochen Versuchsdauer

Wissenschaftler Name	Deutscher Name	getestet an	Mindest-MV	
			CEN/TS 15083-1	EN 113
<i>Coniophora puteana</i>	Brauner Kellerschwamm	Kiefernspiltholz	30 %	20 %
		Buchenholz	30 %	-
<i>Poria placenta</i>	Rosafarbener Saftporling	Kiefernspiltholz	20 %	20 %
<i>Coriolus versicolor</i>	Schmetterlingstramete	Kiefernspiltholz	-	15 %
		Buchenholz	20 %	20 %
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	Balkenblättling	Kiefernspiltholz		20 %

Nach EN 113 sind weitere Gültigkeitskriterien zu beachten, die aber durch die Vornorm

² In CEN/TS 15083-1 wird der Begriff „annehmbar“ nicht präzise definiert.

³ CEN/TS 15083-1 unterscheidet hier nicht zweifelsfrei zwischen dem Median bzw. dem mittleren Masseverlust.

CEN/TS 15679 in Bezug auf die Anwendung auf thermisch modifiziertem Holz wie folgt eingeschränkt wurden:

- es werden keine PK ausgesondert, die einen MV von weniger als 3 % aufweisen,
- es werden keine PK ausgesondert, die in Bezug auf ihren Feuchtegehalt als abnorm erscheinen, d.h. eine End-Feuchte von weniger als 25 % oder mehr als 80 % aufweisen

2.5.4.7 Beurteilungskriterien der natürlichen Dauerhaftigkeit

Wie bei der Gültigkeit der Versuche, muss auch bei den Beurteilungskriterien der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen den Normen CEN/TS 15083-1 und EN 113 (als nach EN 350-1 anzuwendendes Prüfverfahren) unterschieden werden. Während nach CEN/TS 15083-1 die vorläufige Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit direkt mit dem prozentualen medianen MV vorgenommen werden kann (Tabelle 14), muss bei Beurteilung nach EN 350-1 ein x-Wert auf Basis der Ergebnisse der Prüfung nach EN 113 wie folgt berechnet werden.

$$x = \frac{\text{mittlerer korrigierter Masseverlust der Versuchsholz - PK}}{\text{mittlerer korrigierter Masseverlust der Vergleichsholz - PK}} \quad (7)$$

Tabelle 14: Skalen zur vorläufigen Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit nach Agarblocktests nach CEN/TS 15083-1 bzw. nach EN 113

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	CEN/TS 15083-1 Median MV [%]	EN 350-1 x-Wert
1	Sehr dauerhaft	≤ 5	$\leq 0,15$
2	Dauerhaft	$> 5 \text{ bis } \leq 10$	$> 0,15 \text{ bis } \leq 0,30$
3	Mäßig dauerhaft	$> 10 \text{ bis } \leq 15$	$> 0,30 \text{ bis } \leq 0,60$
4	Wenig dauerhaft	$> 15 \text{ bis } \leq 30$	$> 0,60 \text{ bis } \leq 0,90$
5	Nicht dauerhaft	> 30	$> 0,90$

2.5.5 Statistische Auswertungen

Alle Daten wurden mit einer mehrfaktoriellen ANOVA in SPSS analysiert. Das Signifikanzniveau wurde für alle Tests auf $p < 0,05$ festgelegt. Die Erdkontaktversuche wurden in einem Versuchsdesign mit Messwiederholung untersucht – mit der Versuchsdauer als Messwiederholungsfaktor. Diese betrug gemäß CEN/TS 15083-2 (ENV 807) bei 8, 16, 24 und 32 Wochen. Unveränderliche Faktoren waren die Baumart, die Untersuchungsvariante (Kontrolle, 160°C und 180°C) und ggf. die Stammzone (Kern/Splint). Für die Agarblocktests wurde des Weiteren der Prüfpilz als unveränderlicher Faktor behandelt. Der Tukey HSD post hoc Test wurde durchgeführt, um Unterschiede in den mittleren Masseverlusten je Baumart und Untersuchungsvariante aufzuzeigen.

3 Erzielte Ergebnisse

3.1 Holztechnologische Untersuchungen

Im Zuge der hydrothermischen Behandlung kommt es zu einem partiellen Abbau von Holzsubstanz, aber auch zur Bildung neuer Verbindungen. Hiervon betroffen sind nach bisherigem Erkenntnisstand vor allem die Hemicellulosen. Der Abbau findet je nach Holzart unterschiedlich stark statt. Auf Grund der dadurch verringerten Zahl von frei verfügbaren Hydroxylgruppen, nimmt behandeltes Holz bei gleicher Umgebungsfeuchte weniger Feuchtigkeit auf. Substanzabbau und ein verändertes Sorptionsvermögen führen zu einer verringerten Roh-Dichte des behandelten Holzes und beeinflussen die Festigkeitseigenschaften. Das Ausmaß der Reduzierung der verschiedenen Festigkeitseigenschaften ist - neben der Holzart - abhängig von der Intensität der Behandlung.

Um den Grad der Veränderung der Festigkeitseigenschaften der behandelten Hölzer beurteilen zu können, wurden Untersuchungen zum hitzebedingten Substanzabbau, zur Brinell-Härte, Biegefestigkeit und Biege-E-Modul sowie zur Bruchschlagarbeit durchgeführt. Die Ergebnisse der thermisch behandelten Hölzer wurden zum Vergleich den Festigkeiten unbehandelter Proben gegenübergestellt.

3.1.1 Physikalische Holzeigenschaften

3.1.1.1 Behandlungsbedingter Masseabbau und Veränderung der Holzdichte

Als erstes werden die leicht flüchtigen Bestandteile des Holzes abgebaut. Mit zunehmender Behandlungstemperatur erfolgt je nach baumartenabhängiger Zusammensetzung der Hauptbestandteile Zellulose, Hemicellulose und Lignin ein weiterer Abbau an Holzsubstanz. Die Darrdichte der thermisch behandelten Hölzer ist entsprechend dem hitzebedingten Substanzabbau gegenüber der unbehandelten Variante verringert. Die Normal-Rohdichte (bei Lagerung in 20°C und 65% RH) der thermisch behandelten Hölzer ist darüber hinaus auch aufgrund einer reduzierten Feuchtigkeitsaufnahme gegenüber dem unbehandelten Holz verringert.

Mit Ausnahme des Tannenholzes, wurde bei den Laubhölzern ein höherer Substanzabbau festgestellt (Tabelle 15). Bei den Laubhölzern zeigte das Eichenholz den relativ höchsten Substanzabbau.

Tabelle 15: Darrdichte, Dichte im Normal-klima und Substanzabbau (SA) nach thermischer Behandlung

Baumart	Variante	Darrdichte [kg/m ³]	Normal- Rohdichte [kg/m ³]	SA [%]
Buche	unbeh.	704	730	
	160°C	652	670	5
	180°C	618	630	8
Esche	unbeh.	665	690	
	160°C	631	648	4
	180°C	602	619	7
Eiche	unbeh.	639	712	
	160°C	575	600	15
	180°C	540	560	17
Fichte	unbeh.	430	453	
	160°C	420	436	1
	180°C	423	433	0
Kiefer	unbeh.	536	562	
	160°C	516	539	2
	180°C	519	533	1
Tanne	unbeh.	426	449	
	160°C	383	397	9
	180°C	380	391	9

3.1.1.2 Sorptionsvermögen

Das veränderte Sorptionsvermögen resultiert in einer Verringerung des Quell- und Schwindvermögens und führt somit zu einer Erhöhung der Dimensionsstabilität. Insgesamt zeigt sich, dass durch die thermische Behandlung bei den Laubhölzern eine stärkere Beeinflussung bzw. ein stärkerer Effekt als bei den Nadelhölzern herbeigeführt wurde. Dies lässt sich durch den höheren Anteil an Hemicellulose der Laubhölzer erklären. Da bei der thermischen Modifizierung vor allem die Hemicellulose vom Abbau betroffen ist, führt dies bei den Laubhölzern anteilmäßig zu einem entsprechend höheren Abbau und somit zu einer größeren Veränderung des Sorptionsvermögens. In Abbildung 9 sind beispielhaft die Sorptionskurven von unbehandelten sowie behandelten Prüfkörpern der Holzart Buche dargestellt.

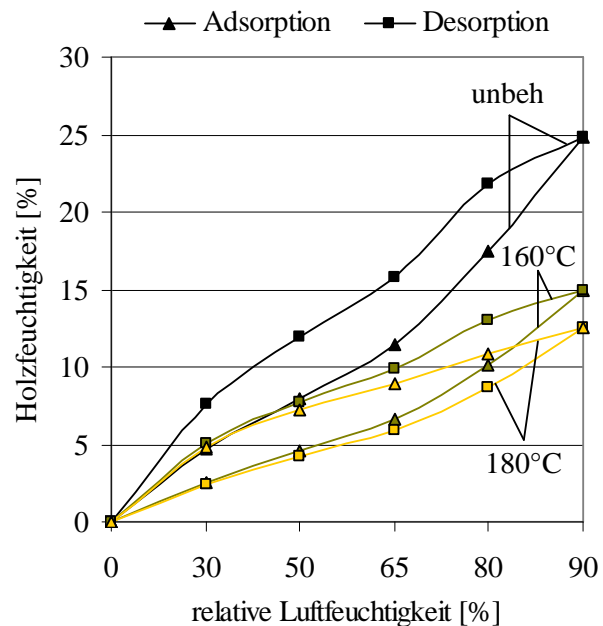


Abbildung 9: Sorptionsvermögen von behandeltem und unbehandeltem Buchenholz

Der für unbehandeltes Holz bekannte, ellipsenförmige Verlauf der Adsorptions- und Desorptionskurven zeigte sich auch bei den thermisch behandelten Prüfkörpern. Die Gleichgewichtsholzfeuchten lagen bei Feuchtigkeitsabnahme über den Holzfeuchten bei Feuchtigkeitszunahme. Bei allen Holzarten war zu erkennen, dass aufgrund der thermischen Behandlung eine Verringerung des Sorptionsvermögens erzielt wurde. Bereits bei einem relativen Luftfeuchtigkeitsgehalt von 30% waren deutlich Unterschiede im Sorptionsvermögen zwischen dem unbehandelten Holz und den thermisch behandelten Hölzern zu erkennen. Das Sorptionsvermögen verringerte sich bei einem relativen Luftfeuchtigkeitsgehalt von 90% je nach Holzart und Behandlung um bis zu 50%. Lediglich Tanne zeigte eine schwächere Verringerung. Hier lag die Verringerung der Sorptionsvermögen nur bei etwa 20%.

Bei Buche, Esche und Tanne zeigte sich, dass durch eine Erhöhung der Behandlungstemperatur von 160°C auf 180°C zwar eine weitere Verringerung der Sorptionsvermögen erreicht wurde, diese aber verhältnismäßig gering war. Bei Fichte und Kiefer dagegen wurde durch die Erhöhung der Behandlungstemperatur von 160°C auf 180°C eine weitere starke Verringerung des Sorptionsvermögens erreicht.

3.1.1.3 Quellen- und Schwinden hygro-thermisch behandelten Holzes

Eine ausführliche Darstellung der Quellungs- und Sorptionseigenschaften der mit dem WTT-Verfahren behandelten Holzarten Buche, Esche, Eiche und Tanne findet sich in STOLERU (2007). Hier wird detailliert auf die Kennwerte nach DIN 52184 wie beispielsweise der differentiellen Quellung, den Quellungskoeffizienten, der Quellanisotropie dem maximalen linearen Quellmaß und dem Trocknungs-Schwindmaß eingegangen. Nachfolgend wird der Einfluss der hygro-thermischen Behandlung auf die Quell- und Schwindeigenschaften anhand

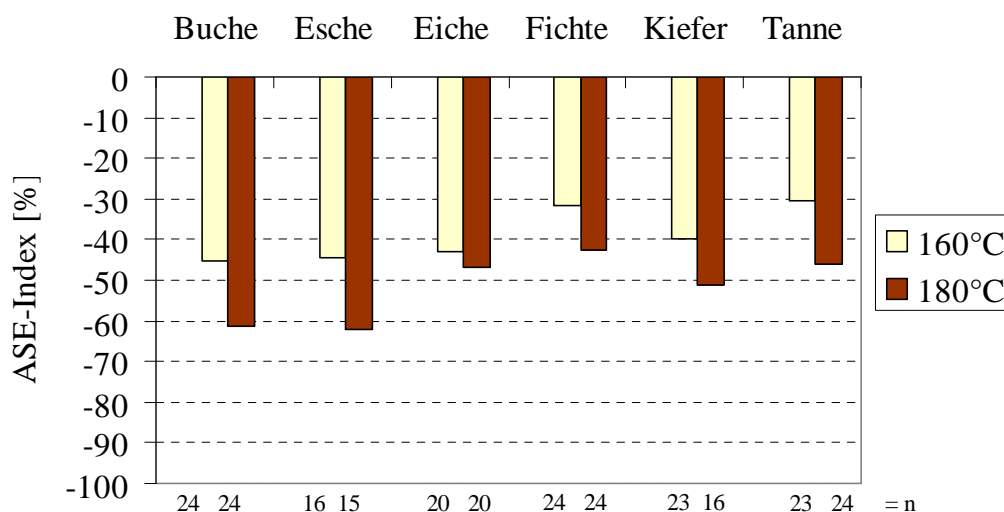


Abbildung 10: Reduktion des Quell- und Schwindvermögens für die untersuchten Holzarten und für alle Untersuchungsvarianten

der Ergebnisse der Berechnungen zum ASE-Indexes dargestellt. Dieser wurde über die, durch die tangentielle und radiale Seite gebildete, Querschnittsfläche der PK errechnet. Ein ASE-Index von 0 % gibt an, dass das vergütete Holz das gleiche maximale Quellmaß wie das unbehandelte Holz aufweist. Ein Index von 100 % bedeutet dagegen, dass keine Quellung des behandelten Materials aufgetreten ist, d.h. dass das Holz völlig dimensionsstabil ist.

Wie zu erwarten, zeigten die thermisch behandelten Proben aller untersuchten Holzarten eine deutlich höhere Dimensionsstabilität im Vergleich zu den unbehandelten Hölzern. Die 160°C-Variante zeigte je nach Holzart einen ASE-Index zwischen 31 % (Tanne) und 45 % (Buche, Esche). Die 180°C-Variante zeigte einen noch höheren ASE-Index zwischen 43 % (Fichte) und 62 % (Esche). In Abbildung 10 ist der negative ASE-Index als Indikator der Reduktion des Quell- und Schwindvermögens abgebildet.

3.1.2 Mechanische Holzeigenschaften

Im Zuge der thermischen Behandlung von Holz findet eine Veränderung der Holzstruktur statt, die sich unmittelbar auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Im Folgenden werden ausgewählte Festigkeitseigenschaften der behandelten im Vergleich zu den unbehandelten Hölzern vorgestellt.

3.1.2.1 Brinell-Härte

Generell war bei allen Holzarten, mit Ausnahme der nicht signifikanten Unterschiede der Holzart Kiefer, nach einer zunächst stattfindenden Reduktion bei einer Behandlungstemperatur von 160°C ein erneuter Anstieg der Härte bei 180°C zu erkennen (Abbildung 11). Bei Buche, Esche und Tanne wies die Temperaturvariante 180°C zwar leicht höhere jedoch nicht signifikant unterschiedliche Werte als das unbehandelte Holz auf. Am stärksten war ein signifikanter Rückgang mit 14 N/mm² bzw. 28 % beim Eichenholz zu verzeichnen.

3.1.2.2 Biegefestigkeit und E-Modul

Die Ergebnisse zeigten für alle Holzarten eine deutliche Reduktion der Biegefestigkeit durch

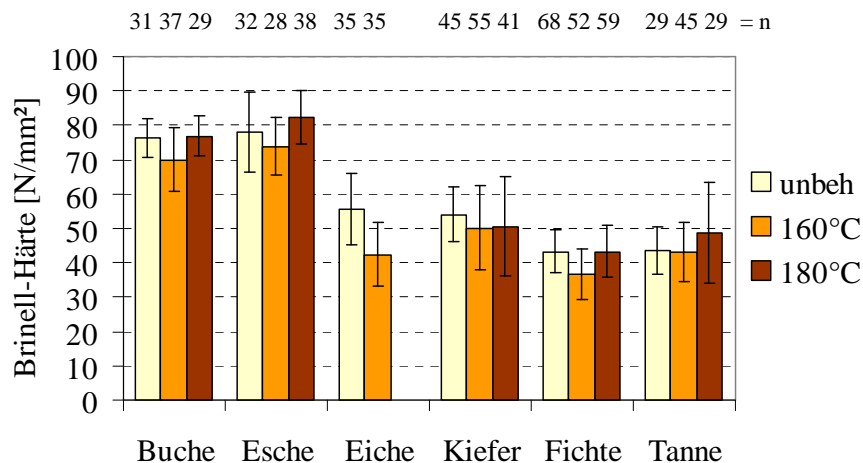


Abbildung 11: Mittelwerte und Standardabweichung der Brinell-Härte der untersuchten Temperaturvarianten

die thermische Behandlung. Am stärksten war der Rückgang bei Fichte und Buche. Dort verringerte sich die Biegefestigkeit um jeweils ca. 37% (bei einer Behandlungstemperatur von 160°C). Den geringsten Rückgang wies Eiche auf (8%). Bei Buche, Fichte und Kiefer zeigte sich bei höherer Temperatur (180°C) ein, im Vergleich zur 160°C Variante, geringfügiger, im Bereich der Streuung liegender, Anstieg der Biegefestigkeit. Bei Esche und Tanne dagegen verringerte sich die Biegefestigkeit mit zunehmender Temperatur weiter (Abbildung 13 und 13).

Die Ergebnisse für den statischen E-Modul zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Untersuchungsvarianten. Für alle Baumarten waren die Veränderungen des statischen E-Moduls gering (Abbildung 12). Buche und Tanne wiesen jeweils einen leichten Anstieg des statischen E-Moduls mit Zunahme der Behandlungstemperatur auf. Esche dagegen wies einen entgegengesetzten Trend auf – der statische E-Modul nahm mit der Behandlung leicht ab. Bei Fichte und Kiefer war nach einem zunächst leichten Abfall des E-Moduls bei der Behandlungstemperatur von 160°C ein erneuter leichter Anstieg des E-Moduls bei der 180°C-

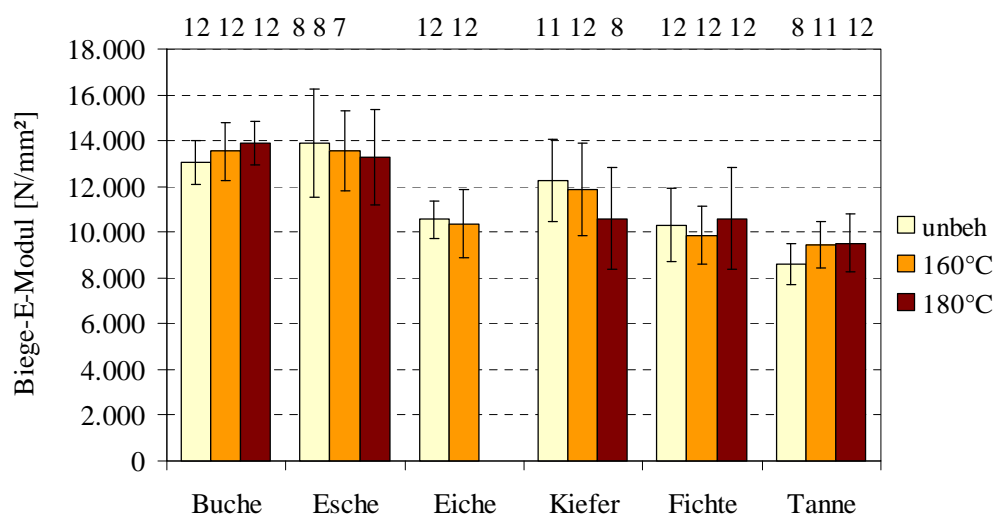


Abbildung 12: Mittelwerte für das statische E-Modul der verschiedenen Untersuchungsvarianten

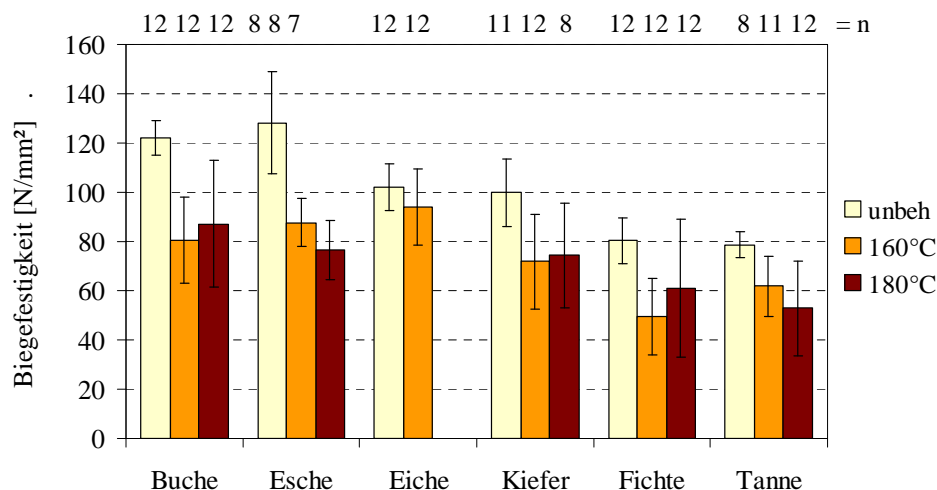


Abbildung 13: Mittelwerte für die Biegefestigkeit der verschiedenen Temperaturvarianten

Variante zu erkennen. Die Werte der 180°C-Variante lagen dabei sogar leicht über denen des Ausgangswertes des unbehandelten Holzes.

3.1.2.3 Bruchschlagarbeit

Wie für die Biegefestigkeit bereits geschildert, reduzierte sich auch die Bruchschlagarbeit infolge der thermischen Behandlung. Die Unterschiede zwischen den Untersuchungsvarianten waren bei den Laubhölzern durchweg signifikant. Für die Nadelhölzer muss zwischen den Behandlungsvarianten unterschieden werden. Bis auf Fichtenholz waren die Unterschiede zwischen den thermisch behandelten Hölzern nicht signifikant (Abbildung 14). Im einzelnen wurden folgende Änderungen festgestellt: Bei 160°C lag der Rückgang der Bruchschlagarbeit bei Buche bei 39% und für 180°C bei 55%. Eiche zeigte einen Rückgang der Bruchschlagarbeit bei 160°C in Höhe von etwa 25%. Während Fichtenholz sich nach einem zunächst deutlichen Rückgang bei 160°C anschließend bei 180°C ein Wert, der auf dem Niveau des unbehandelten Holzes liegt.

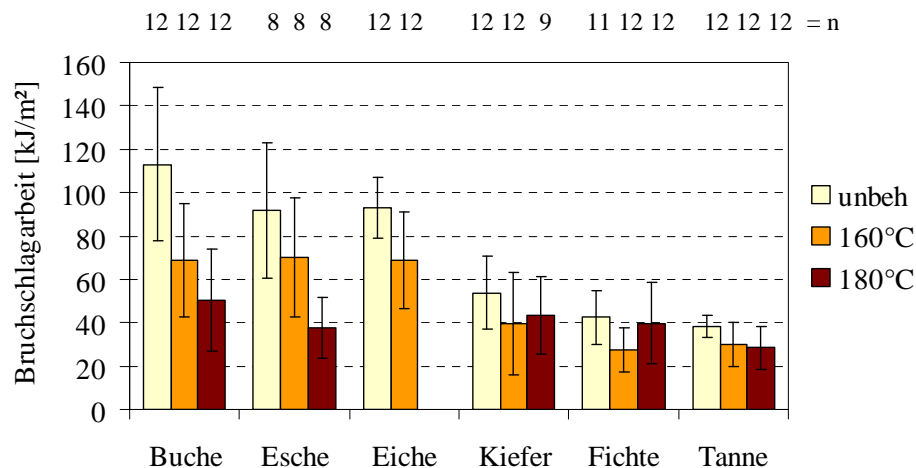


Abbildung 14: Mittelwerte für die Bruchschlagarbeit der verschiedenen Temperaturvarianten für die Nadelholzarten Fichte, Kiefer und Tanne

3.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigten, dass durch die hydrothermische Behandlung eine deutliche Reduktion des Sorptionsvermögens (der Wasseraufnahmefähigkeit) sowie des Quells und Schwindens erzielt wurde, wodurch sich die Dimensionsstabilität deutlich erhöhte. Je nach Holzart und Behandlungstemperatur waren die Effekte allerdings unterschiedlich stark.

Wie bereits in früheren Arbeiten zu anderen thermischen Modifikationsverfahren berichtet, wurde auch beim dem hier untersuchten Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren eine holzartenabhängige Reduktion einiger Festigkeitseigenschaften festgestellt.

Die Ergebnisse der Brinell-Härte zeigten einen weniger starken bis kaum messbaren Unterschied zwischen den Untersuchungsvarianten. Dies kann zum einen auf die reduzierte Holzfeuchte der behandelten Prüfkörper zurückzuführen sein, da die Festigkeit von Holz mit abnehmender Holzfeuchte zunimmt. Zum anderen wird über eine Zunahme kristalliner Strukturen der Zellulosen bei höherer Behandlungstemperatur berichtet (Runkel und Luthgens, 1956), welche für eine Erhöhung der Oberflächenhärte verantwortlich sein könnte.

Die Ergebnisse zum statischen E-Modul und zur Biegefestigkeit bestätigten die Ergebnisse von Untersuchungen zu anderen Verfahren der thermischen Modifizierung (bspw. Brischke und Rapp, 2004; Wagenführ et al., 2005). Die Elastizität wird hiernach durch die thermische Behandlung kaum, die mechanischen Brucheigenschaften jedoch deutlich negativ beeinflusst. Dabei zeigten die Laubhölzer eine relativ stärkere Abnahme der Biegefestigkeit und Bruchschlagarbeit als die Nadelhölzer. Die absoluten Festigkeiten der untersuchten Laubhölzer lagen allerdings auch nach hygro-thermischer Behandlung immer noch über dem Festigkeitsniveau der behandelten Nadelholzproben und zudem meist auch über dem Niveau unbehandelter Nadelholzproben.

Die vorliegenden Ergebnisse basieren auf fehlerfreien Normproben und sind daher nicht ohne weiteres auf Gebrauchsabmessungen mit größeren Querschnitten übertragbar. So kann thermisch behandeltes Holz in Bauteilgröße je nach Qualität des verwendeten Ausgangsmaterials vermehrte Rissbildung aufweisen. Aufgrund des teilweise erheblichen Rückgangs einiger Festigkeitskennwerte, sollte thermisch behandeltes Holz – so auch nach dem WTT-Verfahren behandeltes Holz – nach derzeitigem Erkenntnis- und Entwicklungsstand nicht in Tragwerkskonstruktionen verwendet werden.

3.2 Holzbiologische Untersuchungen

3.2.1 Erdkontaktversuche

Für den Versuch nach CEN/TS 15083-2 bzw. ENV 807 zur Resistenz gegenüber Moderfäulepilzen und anderen Mikroorganismen wurden die Prüfkörper in einem Substrat aus natürlicher Oberflächenerde für maximal 32 Wochen eingebracht. Jeweils nach 8, 16 und 24 Wochen wurden bereits Proben entnommen, um den vorschreitenden Substanzabbau zu beobachten.

Vor der quantitativen Ermittlung der Masseverlustes (MV) wurden nach der Entnahme der Prüfkörper aus dem Erds substrat anhaftendes Mycel und Erdesubstrat mit behutsam entfernt, so dass nur der Holzkörper verblieb. Bereits nach der Säuberung konnte visuell eine Einschätzung des Fäulebefalls erfolgen. Bei einem hohen MV infolge Befalls durch Pilze und Mikroorganismen, zeigten die Prüfkörper eine schwammige und brüchige Konsistenz und wiesen teilweise Perforierungen auf (Abbildung 15).

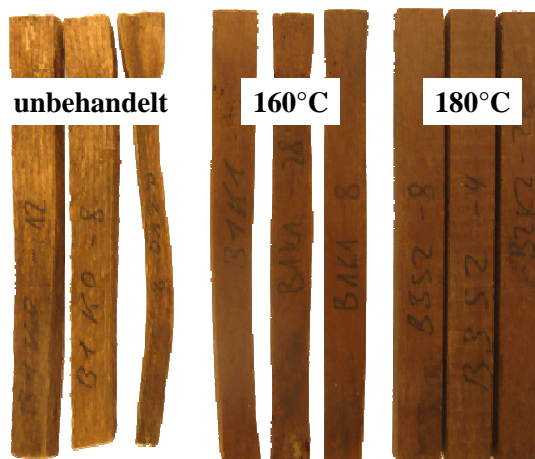


Abbildung 15: Buchenprüfkörper nach 32-wöchigem Erdkontaktversuch und anschließender Darrtrocknung

Bei einem Holzfeuchtegehalt von weniger als 20 %, gilt die Gefahr eines Befalls mit Holz zerstörenden Pilzen als gering (prEN 335-2). Im Gegensatz zu unbehandeltem Holz, wurde dieser Holzfeuchtebereich bei den thermisch behandelten Prüfkörpern selbst bei Lagerung in nahezu mit Wasserdampf gesättigter Luft nicht erreicht (vgl. Beispiel Buchenholz in Abbildung 9). Bei einer Lagerung von Holz in befeuchteter Erde sind dagegen höhere Holzfeuchtegehalte zu erwarten. Die Feuchtigkeit des Erdesubstrats wurde anhand von unbehandelten Feuchte-PK'n überwacht, die in regelmäßigen Abständen durch neue PK ausgetauscht wurden. Nach Versuchsende – direkt nach der Entnahme aus dem Erds substrat und der anschließenden Säuberung der Prüfkörper – wurde das Frischmasse ermittelt, um daraus den Holzfeuchtegehalt zu berechnen. In Abbildung 16 sind die Holzfeuchtegehalte beispielhaft für Buchen- und Kiefern splintholz nach Entnahme aus dem Erdesubstrat dargestellt. Während das Kiefern splintholz in allen Untersuchungsvarianten einen ähnlich hohen Holzfeuchtegehalt von etwa 85% aufwies, zeigte das unbehandelte Buchenholz bereits nach acht Wochen Versuchsdauer einen Holzfeuchtegehalt von weit mehr als 100%. Dieser erhöhte sich mit längerer Versuchsdauer und damit einhergehendem zunehmenden Masseabbau infolge Pilzbefalls. Die Prüfkörper zeigten vermehrt eine schwammigere Konsistenz. Hingegen steigerte sich der Feuchtegehalt bei den thermisch behandelten PK'n der 160°C-Variante nur mäßig bzw. blieb gleich im Falle der 180°C-Variante.

werden. Bei den Nadelhölzern zeigte sich die Tendenz im MV nur bei den nicht thermisch behandelten Vergleichs-PK.

Erwartungsgemäß zeigten die Proben des Buchenholzes ohne thermische Behandlung mit etwa 60% die höchsten pilzbedingten MV – gleichzeitig aber auch die deutlichste relative Verbesserung der Resistenz infolge thermischer Behandlung. So zeigten die Proben der 160°C-Variante einen MV von nur noch 17 bis 21% und die der 180°C-Variante von unter 5%. Der Effekt der thermischen Behandlung war signifikant – der Effekt der Stammzone (Kern-Splintholz) jedoch nicht. Einen signifikanten Effekt zeigte die thermische Behandlung auch beim Eschen- und beim Eichenholz. Unbehandeltes Eschenholz zeigte ferner einen signifikant höheren MV beim Splintholz. Beim Eichenholz wurde kein Splintholz, sondern Übergangsholz aus dem splintnahen Bereich untersucht, welches aber keinen signifikanten Unterschied zum Kernholz zeigte.

3.2.1.2 Masseverluste der Nadelhölzer

Auch bei den Nadelhölzern zeigten sich signifikante Unterschiede im pilzbedingten Masseverlust zwischen den Untersuchungsvarianten. Diese waren jedoch nicht so ausgeprägt, wie bei den Laubhölzern. Bei obligatorischen Kernholzbildnern wie der Kiefer verringerte sich der Unterschied in der Resistenz zwischen Kern- und Splintholz infolge thermischer Behandlung und das Splintholz zeigte nun eine vergleichbare Resistenz.

Zusätzlich wurde für die untersuchten Nadelholzarten Kiefer, Fichte und Tanne in Anlehnung an CEN/TS 15083-2 der statische Elastizitätsmodul vor und nach der Inkubation im Erdesubstrat ermittelt. Bei Betrachtung des anfänglichen MOE und des MOE-Abfalls nach 32-wöchiger Inkubation zeigte sich ein deutlicherer Einfluss der Holzzerstörung durch den Pilzangriff als dies durch die MV erkennbar war (vgl. Abbildung 18 und 19). Besonders für die nicht thermisch behandelten Proben wurde ein zum Teil erheblicher Abfall des statischen MOE bei Fichten und Kiefern Splintholz von bis zu 50 % ermittelt.

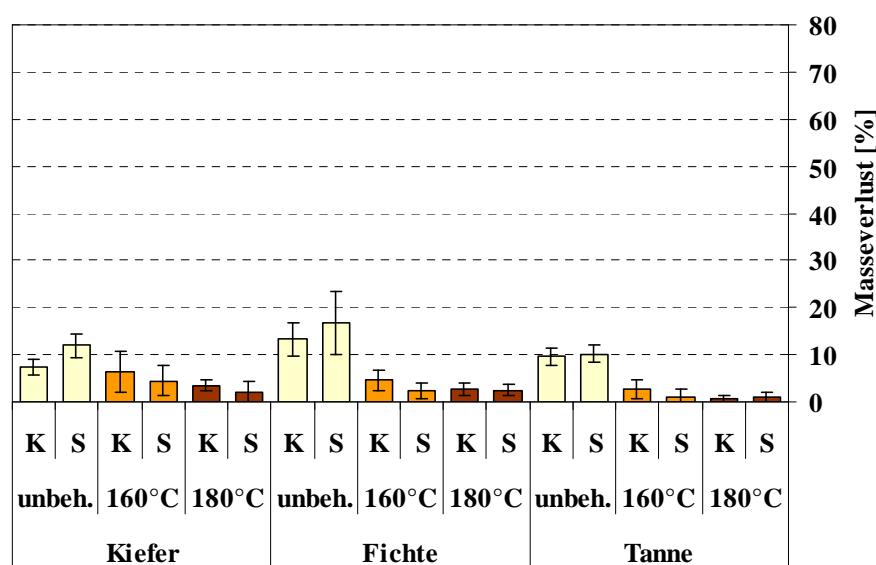


Abbildung 18: Masseverluste aus Erdkontaktversuchen nach CEN/TS 15083-2 bzw. ENV 807 für die untersuchten Nadelhölzer (K = Kernholz; S = Splintholz) nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat

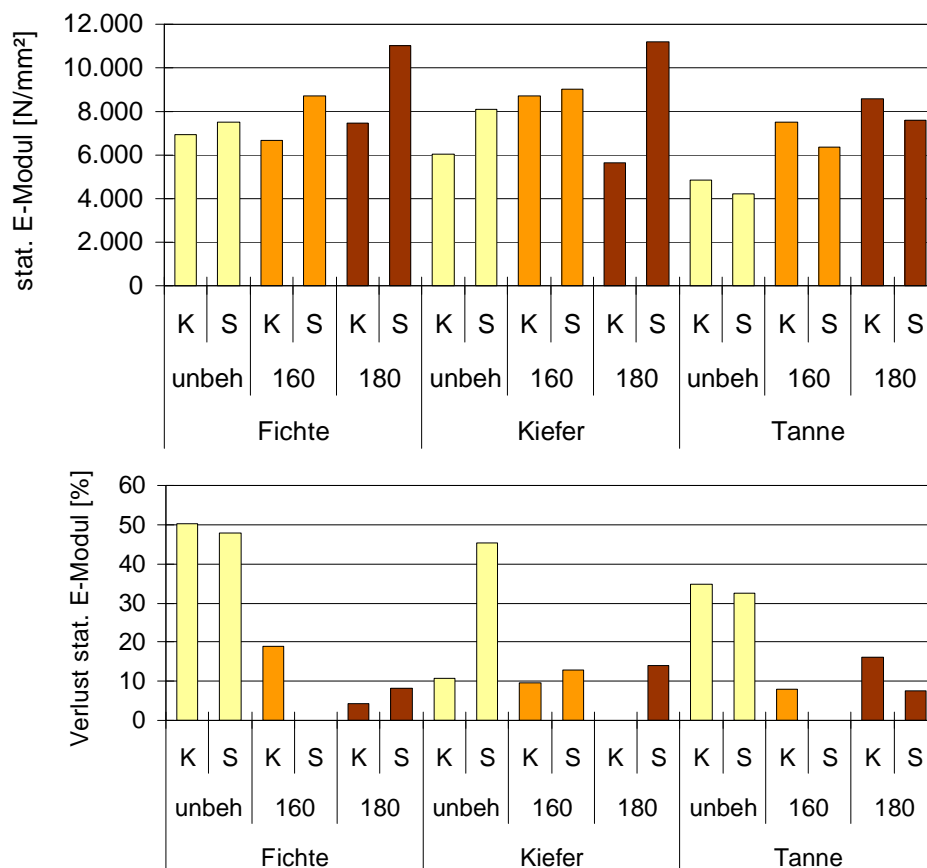


Abbildung 19: MOE vor Erdkontaktversuchen (obere Grafik) für die untersuchten Nadelhölzer (K = Kernholz; S = Splintholz) und prozentualer MOE-Abfall nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat

3.2.1.3 Mikroskopische Schnitte - Moderfäule

Zum Nachweis des Abbaus der Holzsubstanz durch Moderfäule, wurde an repräsentativ ausgewählten Proben eine diagnostisch-mikroskopische Untersuchung durchgeführt. Dafür wurde ein Axiophot (Zeiss) Durchlichtmikroskop verwendet. Dieses Gerät war mit einer digitalen Camera, Axiocam MRc5 (Zeiss), ausgestattet und an einen PC angeschlossen. So war eine Fotografie und Speicherung der mikroskopischen Ansichten möglich. An Dünnschnittpräparaten wurde mithilfe des Axiophot auch präpariertes Pilzmycel in Reinkultur identifiziert und in 50-facher, 100-facher, 200-facher, 400-facher und 1000-facher Vergrößerung fotografiert. Die detaillierte Vorgehensweise dieser Teilstudie ist bei SCHROLL (2009) nachzulesen.

Der Angriff von Moderfäuleerregern kann sich bei Betrachtung von mikroskopischen Schnitten durch zwei verschiedene Arten (von Angriffsmustern) zeigen. Am häufigsten (Typ 1) ist die Bildung von Kavernen in den Zellwänden des Holzes. Typ 2 ist durch die Erosion der Zellwände charakterisiert, was zu dünneren Zellwänden führt. Dieser zweite Typ ist nur bei Laubhölzern (wie z.B. Buche) von Bedeutung.

Bei der mikroskopischen Betrachtung der Radial- und Tangentialschnitte konnten an den unbehandelten Proben aller Holzarten eindeutige Symptome eines Moderfäulebefalls entdeckt werden. Die sekundären Zellwände der Längstracheiden zeigten beispielsweise bei Fichtenholz deutliche, durch Moderfäule verursachte Kavernen. Diese konzentrierten sich vor allem

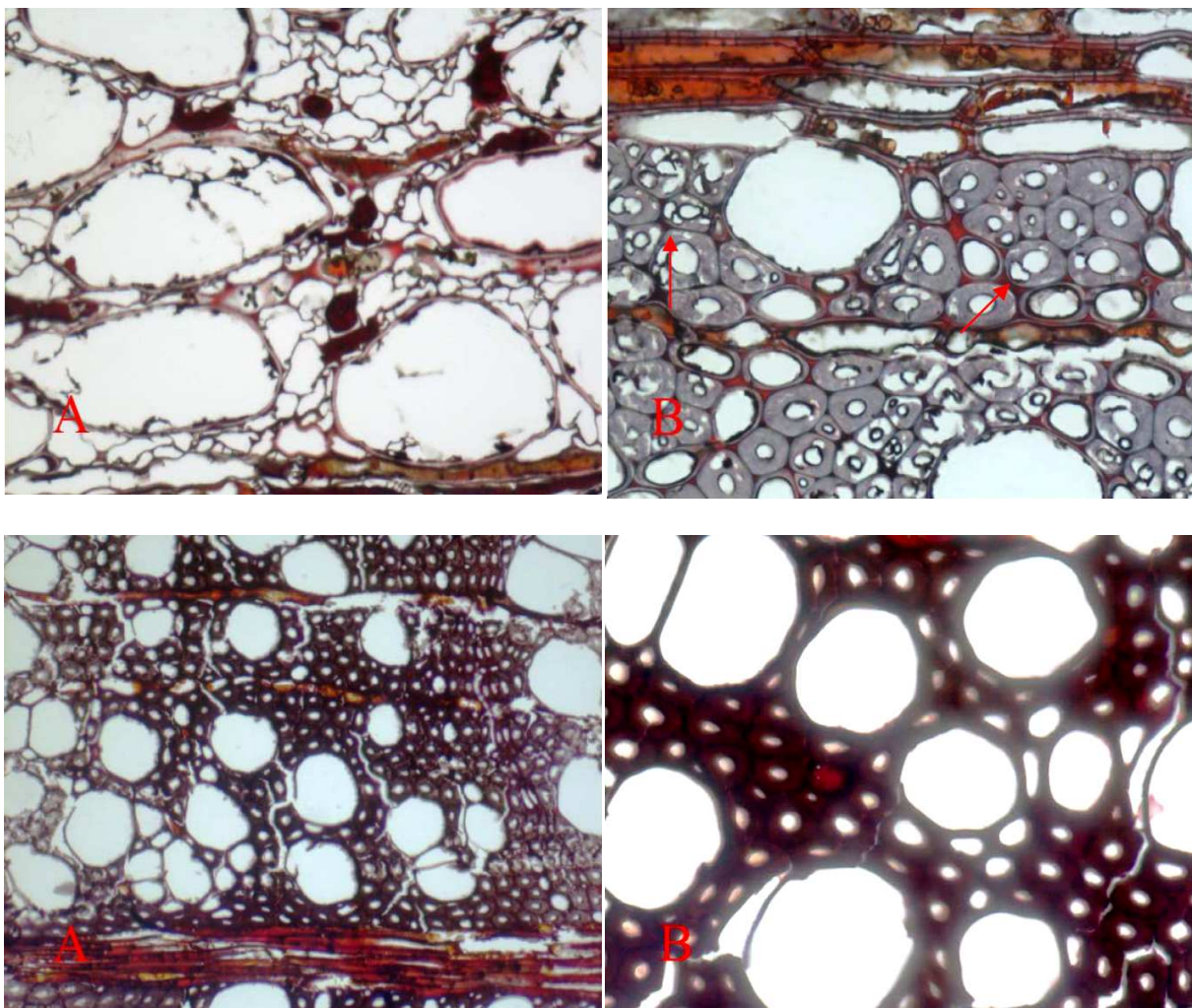


Abbildung 20: 400-fache Vergrößerung mikroskopischer Schnitte von Buchenholz nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat (A Probe aus dem Grenzbereich Boden-Luft; B aus dem Bodenbereich) - obere Reihe unbehandeltes, untere Reihe bei 180°C behandeltes Buchenholz (aus Schroll, 2009)

auf die stärker ausgeprägten Zellwände der Spätholztracheiden, jedoch waren auch im Frühholz Kavernen in den Zellwänden zu erkennen.

Demgegenüber zeigte thermisch behandeltes Fichtenholz zwar deutliche Zersetzungserscheinungen, aber kaum Anzeichen eines Moderfäulebefalls. Beim Buchenholz zeigten die unbehandelte und die 160°C-Variante im Gegensatz zur 180°C-Variante neben einer deutlichen Holzerstörung auch die für Moderfäulebefall typischen Kavernen (Abbildung 20).

3.2.2 Agarblocktests zur Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit

Nach 16-wöchiger Inkubation zeigten weder Kontroll-Prüfkörper noch zu untersuchende Testprüfkörper Anzeichen von Kontamination, die das Abbauvermögen der Prüfpilze hätte beeinflussen können. Der festgestellte geringfügige Masseverlust (MV) der Kontroll-Prüfkörper kam vermutlich durch Verflüchtigung von Holzinhaltsstoffen zustande. Er betrug zwischen 0,73 und 5,36 % je nach Baumart und Untersuchungsvariante und wurde bei der MV-Auswertung nach EN 113 entsprechend berücksichtigt.

Alle Prüfkörper waren entsprechend ihrer Vorbehandlung in unterschiedlichem Ausmaß mit

Mycel des entsprechenden Prüfpilzes bewachsen: Unbehandelte Holzproben waren über alle Holz- und Pilzarten hinweg zumeist am stärksten von Mycel bewachsen. Die bei 160°C behandelten Thermoholzproben zeigten leicht stärkeren Bewuchs als die Thermoholz-PK der 180°C-Variante. Die Intensität des Mycelbewuchses wies dabei nicht zwingend eine positive Korrelation zum Masseverlust auf. Erwartungsgemäß zeigten thermisch behandelte Proben aller Holzarten einen tendenziell deutlich niedrigeren Masseverlust - und damit eine erhöhte Pilzresistenz - als unbehandelte Vergleichsproben. Der positive Effekt der thermischen Behandlung zeigte sich für Nadelhölzer bei der höheren Temperaturvariante von 180°C deutlicher. Bei den Laubhölzern ergab bereits die niedrigere Temperaturbehandlung (160°C) eine deutlich verbesserte Pilzresistenz. Der Prüfpilz „Echter Hausschwamm“ (*Serpula lacrymans*) war bei den untersuchten Laubhölzern für alle Untersuchungsvarianten kaum, bei Nadelholz jedoch hoch virulent.

Wie oben beschrieben, wurde der Masseverlust für jeden Prüfkörper sowohl auf Grundlage der CEN/TS 15083-1 als auch der EN 113 errechnet. Grundsätzlich lag der errechnete Masseverlust einschließlich Korrekturfaktor nach EN 113 leicht niedriger als der nach CEN/TS 15083-1 errechnete Masseverlust. Wurde am Ende der Versuchsdauer an Prüfkörpern eine Zunahme der Darrmasse festgestellt, so sind diese Werte gemäß Norm mit 0 % Masseverlust in die Auswertung eingegangen. Im Gegensatz zur CEN/TS 15083-1 wird nach EN 113 der ermittelte Masseverlust (MV_{unkorr}) mit einem Korrekturfaktor K berichtigt (MV_{kor}). Der Korrekturfaktor steht für eine Massenänderung, die nicht auf eine Beanspruchung durch die Prüfpilze zurückzuführen ist. Er wurde anhand der Kontrollprüfkörper ermittelt.

Die im Folgenden beschriebenen Beobachtungen an den einzelnen Baumarten beziehen sich auf Ergebnisse nach CEN/TS 15083-1, die die Grundlage für die Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegenüber Holz zerstörenden Basidiomyceten darstellt. Des Weiteren verursachten die einzelnen Prüfpilze je nach Baumart und Behandlung zum Teil sehr große Unterschiede im Masseverlust. Die hier beschriebenen Masseverluste beziehen sich jeweils auf den aggressivsten Pilz. Sie stellen damit die erreichten maximalen Masseverluste je Untersuchungsvariante dar.

3.2.2.1 Buche

Beide Thermo-Untersuchungsvarianten führten bei Buchenholz zu einer deutlich höheren Pilzresistenz. Während unbehandelte Buche bei drei Prüfpilzen Masseverluste von über 30% (max. 36%) verzeichnete, konnte selbst der aggressivste Pilz (*Coniophora puteana*) bei TH 160°C nur 12% MV verursachen (Abbildung 21). Die auf Laubholz spezialisierte Schmetterlingstramete (*Coriolus versicolor*) lag mit 11% MV knapp darunter. Mittels der stärkeren Hitzebehandlung (TH 180°C) konnte die Pilzresistenz weiterhin signifikant verbessert werden. Hier zeigte sich der Weißfäule verursachende Laubholzspezialist als aggressivster Prüfpilz, erzeugte aber lediglich 6% MV. Auffallend war der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), dessen Holzabbau sich bei allen 3 Untersuchungsvarianten nicht signifikant voneinander unterschied. Dahingegen unterschieden sich bei den restlichen Prüfpilzen alle Untersuchungsvarianten jeweils hoch signifikant voneinander ($p < 0,001$). Prüfkörper aus Buchenkern- bzw. Splintholz verhielten sich zwar in einigen Pilz-Behandlungskombinationen verschieden (nicht dargestellt), tendenziell ließ sich jedoch kein nennenswerter Unterschied zwischen Kern- und Splintholz feststellen.

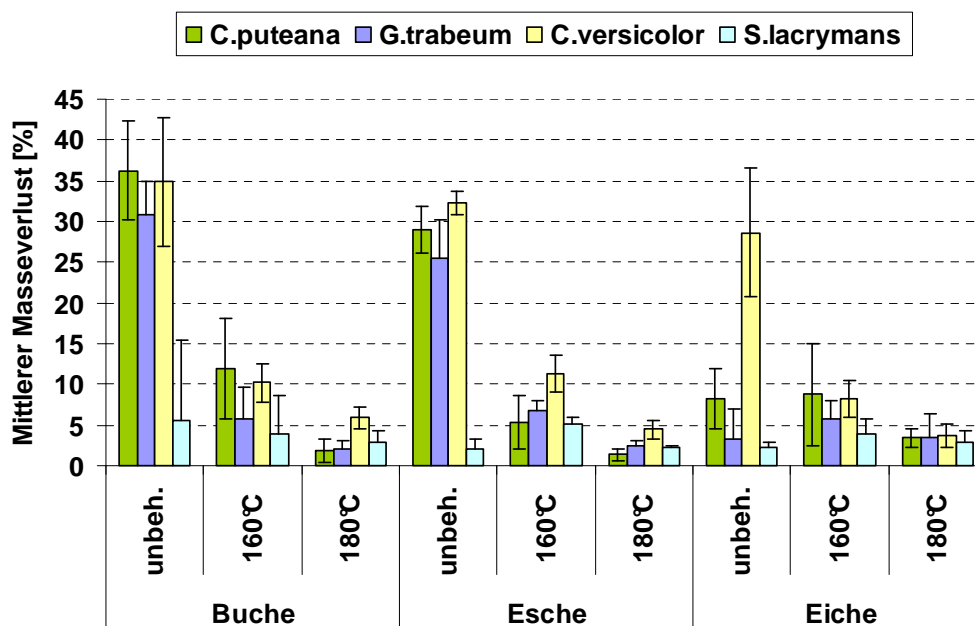


Abbildung 21: Mittlere Masseverluste [%] (n. CEN/TS 15083-1) der untersuchten Laubhölzer nach 16 Wochen Versuchsdauer dargestellt für den jeweiligen Versuchspilz und Untersuchungsvariante

Die verlängerte Prüfdauer von 32 Wochen ergab für den Laubholzpilz *Coriolus versicolor* bei allen Untersuchungsvarianten erhöhte Masseverluste im Vergleich zur Regelprüffrist. Allerdings fielen die Steigerungen weniger hoch aus als bei Tanne. Unbehandelte Buche erreichte einen Masseverlust von 50% während TH 160°C nur knapp über 20% abgebaut werden konnte. Im Gegensatz zur Tanne entsprechen diese Resultate in etwa den Ergebnissen des Erdkontaktversuches, wo unbehandelte Buche nach 32 Wochen 61% und TH 160°C 23% Masseverlust aufwies. Buche scheint daher für Moder- und Weißfäule gleichermaßen anfällig zu sein. Bei der stärkeren Thermobehandlung kam es zu einer nur leicht verschlechterten Resistenzänderung, die immer noch unter 10% Masseverlust lag. Insgesamt war die Effizienz der schwachen und stärkeren thermischen Behandlung auch nach 32 Wochen Inkubationszeit noch sehr deutlich sichtbar (siehe Abbildung 22).

3.2.2.2 Esche

Die einzelnen Untersuchungsvarianten der Esche zeigten sehr ähnliche Resistenzeigenschaften wie die der Buche. Bis auf eine Ausnahme unterschieden sie sich jeweils signifikant voneinander. Erwartungsgemäß war unbehandeltes Eschenholz am wenigsten dauerhaft und wies Masseverluste von ebenfalls über 30% auf. Auch Thermo-Esche verhielt sich in der Dauerhaftigkeit sehr ähnlich der Buche mit maximal 11% MV bei TH 160°C und 5% bei TH 180°C. Bei allen drei Untersuchungsvarianten erwies sich die Schmetterlingstramete (*Coriolus versicolor*) als aggressiver Pilz, was im Einklang mit ihrer speziellen Vorliebe für Laubholz steht. Obwohl Esche getrennt nach Kern-, Übergangs- und Splintholz getestet wurde, konnte nur bei der schwächeren Thermovariante eine leichte Tendenz festgestellt werden, dass Kernholz resistenter als Splint- bzw. Übergangsholz war.

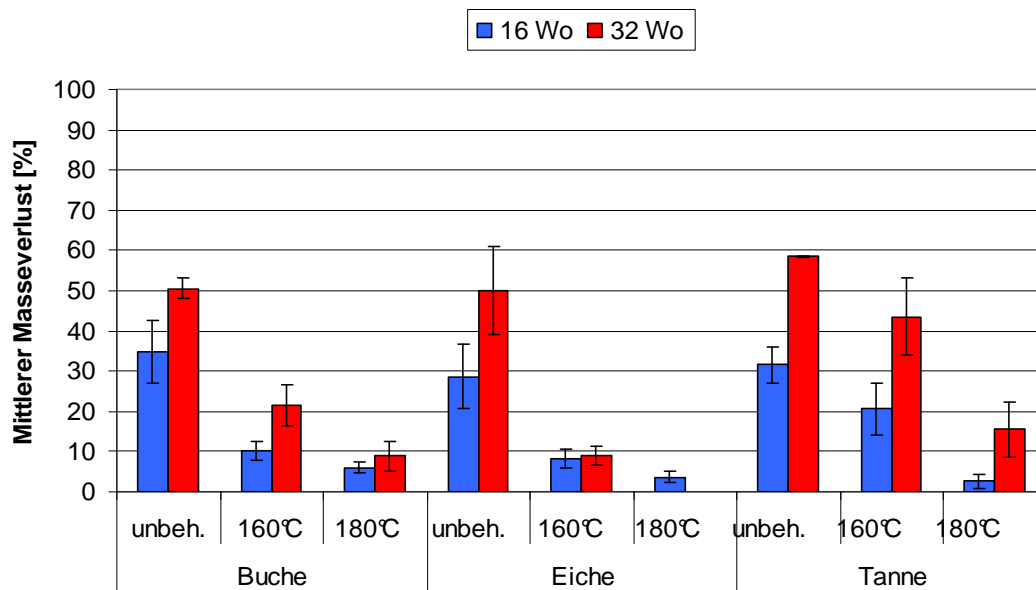


Abbildung 22: Vergleich der Masseverluste (%) nach 16- bzw. 32-wöchiger Prüfdauer verursacht durch *Poria placenta* an Tanne und *Coriolus versicolor* an Buche bzw. Eiche

3.2.2.3 Eiche

Der Prozentbereich des höchsten Masseverlustes je Untersuchungsvariante lag bei Eiche in etwa im Einklang mit den anderen getesteten Laubhölzern (Buche, Esche). Natives Eichenholz wurde von den einzelnen Prüfpilzen jedoch sehr unterschiedlich abgebaut. Während wie bei Esche die Schmetterlingstramete (*Coriolus versicolor*) die meiste Holzmasse abbauen konnte (29% mittlerer MV), erwies sich unbehandeltes Eichenholz gegenüber den übrigen Prüfpilzen als relativ resistent (Kern als auch Splint). Keiner der restlichen Prüfpilze verursachte einen Masseverlust von mehr als 10%. Die hohe Resistenz von unbehandelter Eiche gegenüber den Prüfpilzen ist nicht ungewöhnlich. Auch Welzbacher und Rapp (2002) berichten über sehr niedrige Masseverluste an Eichenkernholz von *C. puteana* und *P. placenta* (0-3%), die sogar unterhalb der Masseverluste von thermisch behandelten Proben liegen.

Der verhältnismäßig starke Effekt der schwachen Thermobehandlung bei Laubholz bestätigte sich bei Eiche ebenfalls. Sowohl Kern- als auch Übergangsholz verloren nur 10% an Masse, wenn es zuvor mit 160°C thermisch behandelt wurde. Aufgrund der ungewöhnlich niedrigen Ergebnisse bei unbehandeltem Eichenholz unterschied sich die schwache Thermobehandlung jedoch nur in einem Prüfpilz (*Coriolus versicolor*) signifikant von unbehandelter Eiche.

Die stärkere Behandlung (TH 180°C) reduzierte den Masseverlust nochmals um ca. die Hälfte auf 4 bis 5 %. Die Abbauraten der einzelnen Pilze zeigten bei beiden Thermovarianten ein einheitlicheres Bild als bei unbehandeltem Eichenholz, auch wenn sich die jeweils aggressivsten Pilze bei Kern- bzw. Übergangsholz unterschieden. Bei zwei Testpilzen war die stärkere Thermobehandlung im Vergleich zur schwächeren nicht signifikant verschieden. In diesen Fällen war allerdings auch keine Signifikanz zwischen unbehandelter und 180°C-behandelter Eiche vorhanden, sodass die Ergebnisse möglicherweise eher einen pilzbedingten als einen behandlungsbedingten Effekt präsentieren. Tatsächlich zeigten bei beiden Prüfpilzen auch die Virulenzprüfkörper nur einen einstelligen Masseverlust. Andererseits fand auch VAN

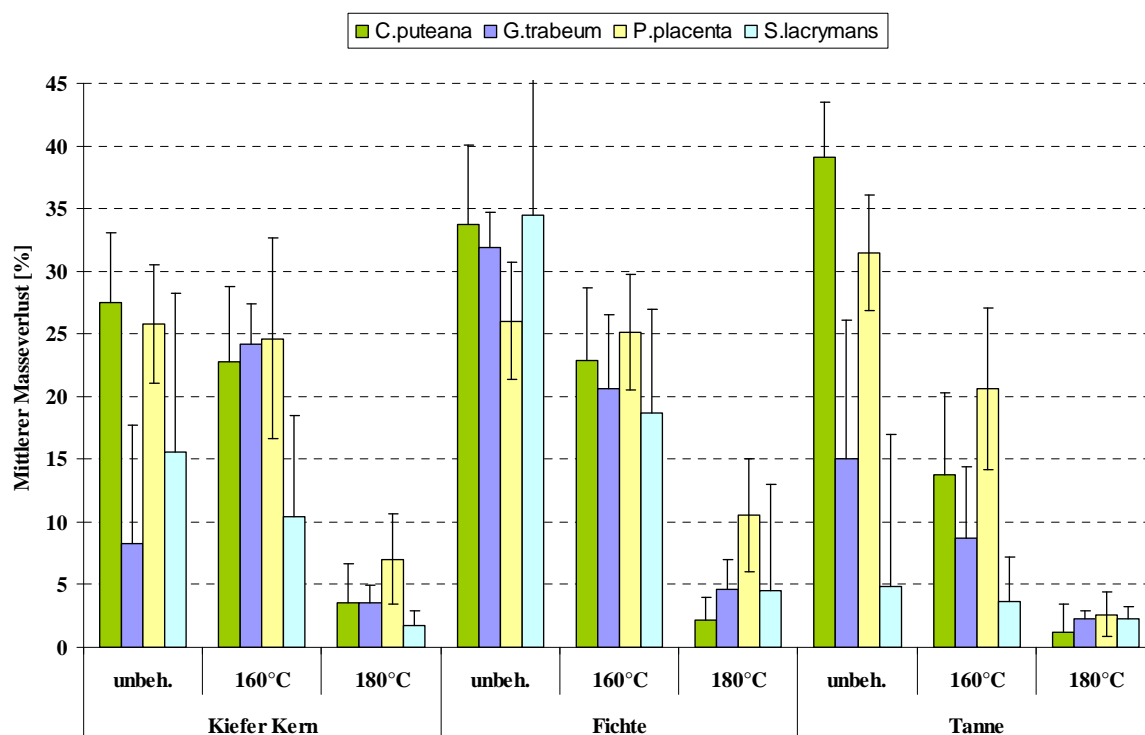


Abbildung 23: Mittlere Masseverluste [%] (CEN/TS 15083-1) der untersuchten Nadelhölzer nach 16 Wochen Versuchsdauer dargestellt für den jeweiligen Versuchspilz und Untersuchungsvariante

ACKER et al. (1999) an unbehandelter Eiche einen nur 1 bis 2-prozentigen Masseverlust für Testpilze nach EN 113. Die verlängerte Inkubationszeit von 32 Wochen konnte für Eiche nur an unbehandeltem und 160°C- behandeltem Thermoholz durchgeführt werden. Es resultierte wiederum ein steigender Holzabbau mit verlängerter Prüfzeit um mehr als 20 % für native Eiche (Abbildung 22).

Überraschend war, dass sich bei der schwachen Thermovariante keine Änderung im Masseverlust selbst nach doppelter Prüfdauer ergab. Leider konnte diese positive Tendenz aufgrund fehlender Prüfkörper nicht an der stärkeren Thermovariante bestätigt werden. Schwach behandelte Thermoeiche verhielt sich somit gegenüber Weiß- und Moderfäule gleichermaßen resistent (jeweils unter 10% MV). Unbehandeltes Eichenholz war hingegen gegen Weißfäule doppelt so anfällig (50% MV) als gegen Moderfäule (25% MV) nach 32 Wochen Prüfdauer.

3.2.2.4 Kiefer

Wie bei allen Nadelholzarten, zeigte die thermische Behandlung der Kiefer bei 180°C einen höchst signifikanten Verbesserungseffekt im Masseverlust nach 16 Wochen Bepilzung ($p < 0,000$). Der höchste Masseverlust lag bei 7%, verursacht durch den Rosafarbigen Saftpilz (*Poria placenta*), alle anderen Testpilze verursachten nur um die 3% (Abbildung 23). Dahingegen hatte die schwächere thermische Behandlung von Kiefernkernholz (TH 160°C) bei Betrachtung des Masseverlustes des aggressivsten Pilzes keine signifikant verbesserte Pilzresistenz zu unbehandelten Vergleichsprüfkörpern. Dieses Ergebnis liegt im Einklang mit Ergebnissen von MAZELA et al. (2004), die bei ähnlich modifiziertem Kiefern Splintholz (160°C) ebenfalls kaum eine erhöhte Abbauresistenz im Vergleich zu unbehandeltem Holz feststellen konnten. Drei der vier Prüfpilze verursachten einen Masseverlust zwischen 20 und 25%. Nur Prüfkörper, die dem Prüfpilz *Serpula lacrymans* ausgesetzt waren, äußerten bereits

bei der schwachen Thermobehandlung (9% MV) eine deutlich erhöhte Resistenz, wohingegen die unbehandelten Proben einen Holzabbau von 22% aufwiesen. Betrachtet man Kern- und Splintholz getrennt, zeigt sich ein Effekt der thermischen Behandlung insofern, dass das gewöhnlich stark pilzanfällige Splintholz nach der Behandlung eine in etwa gleich hohe Pilzresistenz zeigt als Kiefernkerneholz. Bei unbehandeltem Kiefernholz hingegen ist das Splintholz für 2 der getesteten Prüfpilze deutlich anfälliger als das Kernholz. So lag der verursachte MV durch *Serpula lacrymans* bei Splintholz (31%) fast doppelt so hoch als bei Kernholz (16%).

Jedoch zeigte sich auch unbehandeltes Kiefernkerneholz variabel in seiner Pilzresistenz je nach Prüfpilz. Der Balkenblättling (*Gloeophyllum trabeum*) erzeugte Abbauraten zwischen 1 und 25%. Eine große Resistenzvariabilität von Kiefernkerneholz gegenüber diesem Prüfpilz als auch gegenüber dem wichtigen Prüfpilz *Coniophora puteana* (Brauner Kellerschwamm) bestätigte sich auch in Labortests mehrerer anderer Prüfinstitute (VAN ACKER et al. 1998). Dies ist insofern von Bedeutung, als das Kiefern Splintholz als Referenzholzart zur Bestimmung des x-Wertes dient, und daher maßgeblichen Einfluss auf die sich ergebende Dauerhaftigkeitsklasse des Prüfholzes nimmt. In vorliegender Untersuchung gingen die Masseverlustwerte von *C. puteana* als aggressivstem Pilz in die x-Wert Berechnung ein, die im Gegensatz zu den Werten von *G. trabeum* eine Differenzierung der Einzelwerte von 21 bis 37% aufwiesen. Nennenswerte Unterschiede in der Resistenz zwischen Kern- und Splintholz gab es bei den beiden Thermovarianten nicht mehr.

3.2.2.5 Fichte

Unbehandeltes Fichtenholz zeigte eine um 10% verminderte Dauerhaftigkeit (35% MV) gegenüber der schwächeren thermischen Behandlung (TH160°C) (25%). Stärker modifiziertes Thermoholz der Fichte (TH 180°C) lag mit 11% Masseverlust leicht höher als das der Kiefer (7%), zeigte im Vergleich zu den erstgenannten Varianten jedoch eine signifikant verbesserte Pilzresistenz. Vergleichsweise zeigen Untersuchungen von SKYBA (2008) eine um mehr als 50% schlechtere Resistenz für Fichtenthermoholz im Prüfverfahren nach EN 113, welches ebenfalls bei 180°C in gesättigtem Wasserdampf behandelt wurde. BELLMANN (1988) weist hier jedoch auf die Vielzahl von Einflussfaktoren bei Laborversuchen hin und warnt vor einer schnellen literaturübergreifenden Beurteilung der Ergebnisse.

Während unbehandelte Fichte vom Echten Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) am stärksten und vom Rosafarbigem Saftporling (*Poria placenta*) am geringsten angegriffen wurde, war letztgenannter Pilz bei beiden Thermo-Varianten der aggressivste. Dieses Ergebnis wird von anderen Untersuchungen bestätigt, bei denen *Poria placenta* ebenfalls als aggressivster Pilz an Thermoholz auftrat (WELZBACHER und RAPP 2002, LADNER 2003, WELZBACHER 2007). Möglicherweise hat dieser Pilz, der vorzugsweise an Nadelholz vorkommt, eine hohe Toleranz gegenüber chemischen und/oder strukturellen Veränderungen an thermisch modifiziertem Holz und kann daher mehr Holz abbauen als die übrigen Prüfpilze.

Signifikante Unterschiede im Masseverlust zwischen Kern- bzw. Splintholz finden sich bei allen drei Untersuchungsvarianten nicht. Auffallend ist jedoch, dass das Kernholz der stärkeren Behandlung (180°C) über alle Prüfpilze hinweg schlechtere Resistenzergebnisse erzielte als das Splintholz der gleichen Behandlungsart. Da das TH 180°C jedoch ohnehin sehr geringe Masseverluste im Bereich von 2 bis 11 % zeigte, war dieser Unterschied vergleichsweise gering (maximal 5 % MV Unterschied).

3.2.2.6 Tanne

Die Pilzresistenz von Tanne zeigt für natives als auch für schwach thermisch behandeltes Holz ein deutlich uneinheitlicheres Bild als bei Kiefer und Fichte. Unbehandeltes Tannenholz weist die höchste Pilzanfälligkeit auf, allerdings mit einem relativ breit gestreuten mittleren MV im Bereich von 8 bis 39% je nach Prüfpilz (Splint und Kern zusammengefasst). Wie auch bei unbehandelter Kiefer war der braune Kellerschwamm (*Coniophora puteana*) der aggressivste Pilz. An unbehandelter Tanne zeigte sich auch *Poria placenta*, der sonst eher an Thermoholz eine besondere Stärke aufwies, mit 32% mittlerem MV als relativ starker Holzzerstörer. Der an Kiefer und Fichte recht abbaufähige Echte Holzschwamm (*Serpula lacrymans*) verursachte an unbehandelter Tanne als auch an TH 160°C nur einen sehr geringen mittleren Masseverlust von 5 bzw. 4%.

Der Holzabbau von Tannenholz mit schwacher Thermobehandlung lag zwischen 4 und 21% und war somit ebenfalls recht breit gestreut. Betrachtet man die aggressivsten Pilze, brachte die schwache Thermobehandlung jedoch eine signifikante Resistenzverbesserung zur unbehandelten Variante. Dabei erwies sich Splintholz bei drei der vier Prüfpilze als geringfügig resistenter als das Kernholz (um ca. 5%). Thermoholz 180°C erwies sich als sehr dauerhaft und brachte eine signifikante Verbesserung zur schwächeren thermischen Behandlung. Keiner der Prüfpilze führte zu einem mittleren Masseverlust von mehr als 3%. Wiederum war *Poria placenta* der aggressivste Pilz an dieser Untersuchungsvariante.

Um der Frage nachzugehen, ob aus einer verlängerten Prüffrist weiter steigende Masseverluste resultieren, wurden einige Tannenprüfkörper für eine verlängerte Prüfdauer von 32 Wochen dem vor allem bei Thermoholz aggressiven Prüfpilz *Poria placenta* ausgesetzt. Eine statistische Auswertung war aufgrund des geringen Prüfkörperumfangs (3 Wiederholungen pro Untersuchungsvariante) nicht sinnvoll. Dennoch sollen die Ergebnisse kurz dargestellt werden. Es zeigte sich, dass der Masseverlust über die 16 Wochen Regelprüfzeit hinaus bei allen Untersuchungsvarianten weiter zunahm. Unbehandeltes Holz verlor fast 60% an Masse; sein Masseverlust wurde also in den weiteren 16 Wochen nahezu verdoppelt. Ganz im Gegensatz zu den Ergebnissen des Erdkontakt-Versuches, bei dem natives Tannenholz auch nach 32 Wochen nur 11% MV aufwies, sich also deutlich resistenter gegenüber Moderfäule als gegenüber Braunfäule erwies.

Auch bei der schwachen Thermovariante wurde eine Verdopplung des Masseverlustes erreicht. Dieser nahm unter dem gleichen Prüfpilz von 21% nach 16 Wochen auf 43% nach 32 Wochen zu (jedoch nur 5% MV nach EN 807). Das als sehr dauerhaft eingestufte Thermoholz 180°C der Tanne blieb zwar auch nach 32 Wochen Prüfzeit deutlich resistenter als die beiden anderen Untersuchungsvarianten, allerdings verfünffachte sich der Masseverlust verglichen mit den Ergebnissen nach 16-wöchiger Prüfzeit (siehe Abbildung 22).

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hier nur um tendenzielle Ergebnisse handeln kann, da der Probenumfang zu klein war, um aussagefähige und statistisch gesicherte Resultate zu erhalten. Sie werfen jedoch die Frage auf, ob eine 16-wöchige Prüffrist für (Thermo-) Holz, das als sehr dauerhaft eingestuft wird, als ausreichend angesehen werden kann. Es ist allgemein anerkannt, dass Basidiomyceten zum Holzabbau eine bestimmte Mindestfeuchte benötigen, die pilzspezifisch variieren kann, und sie in der Lage sind, diese Feuchte selbst einzustellen. Möglicherweise bedarf es für thermisch modifiziertes Holz aufgrund seines hydrophoben Charakters jedoch eine längere Zeit, bis der Pilz diese Feuchte eingestellt hat. Somit

hätte der Pilz innerhalb einer festgelegten Prüfzeit weniger Zeit, Thermoholzproben zu degradieren als unbehandelte Vergleichsproben. Folglich würde sich ein niedrigerer Masseverlust ergeben, der eine höhere Dauerhaftigkeit suggeriert, als sich unter ausreichend langen Feuchtebedingungen ergeben würde. Dieser Aspekt wird auch von JUNG und MILITZ (2005) diskutiert. In ihrer Untersuchung konnten sie eine Verzögerungszeit im Holzabbau von *C. puteana* beobachten und sahen somit die Notwendigkeit einer verlängerten Prüfdauer, um zwischen wirklicher Dauerhaftigkeit und verzögertem Holzzerfall unterscheiden zu können. *C. puteana* benötigte 5-7 Wochen bevor ein merklicher Holzabbau an modifiziertem, hydrophobem Holz stattfand während unbehandelte Kontrollproben 30 bis 40% Masseverlust nach dieser Zeit aufwiesen. Diese Verzögerungszeit schien jedoch pilzspezifisch zu sein, da ein Holzabbau mit *G. trabeum* früher und gleichmäßiger einsetzte. WÄLCHLI (1977) fand hingegen einen „mehr oder weniger zeitproportionalen Verlauf“ im Abbauverhalten von *C. puteana* (ebenso von *P. placenta* und *G. trabeum*) und stellte eine verlängerte Anlaufzeit nur an *S. lacrymans* und *C. versicolor* fest. Über eventuelle Verzögerungszeiten im Holzabbau in den ersten Wochen geben die Daten aus dieser Studie leider keinen Aufschluss, da die Prüfzeit nicht früher als 16 Wochen beendet wurde.

3.2.3 Holzfeuchte nach Bepilzung

Die durchschnittliche Holzfeuchte nach 16 Wochen Inkubationszeit lag für Laubhölzer über alle Untersuchungsvarianten hinweg bei mindestens 28%, d.h. um dem Fasersättigungspunkt (Grenzwert bei dem sämtliches Wasser im Holz in gebundener Form vorliegt), der holzartenspezifisch meist zwischen 25 und 32% liegt. Freies Wasser stand somit auch bei Thermoholz in den Zellhohlräumen des Holzes für das Pilzwachstum trotz seines hydrophoben Charakters zur Verfügung. Basidiomyceten sind in der Lage, Wasser und Nährstoffe über weite Entfernungen zu transportieren (JENNINGS 1984). Unbehandelte Laubholz-Prüfkörper hatten einen

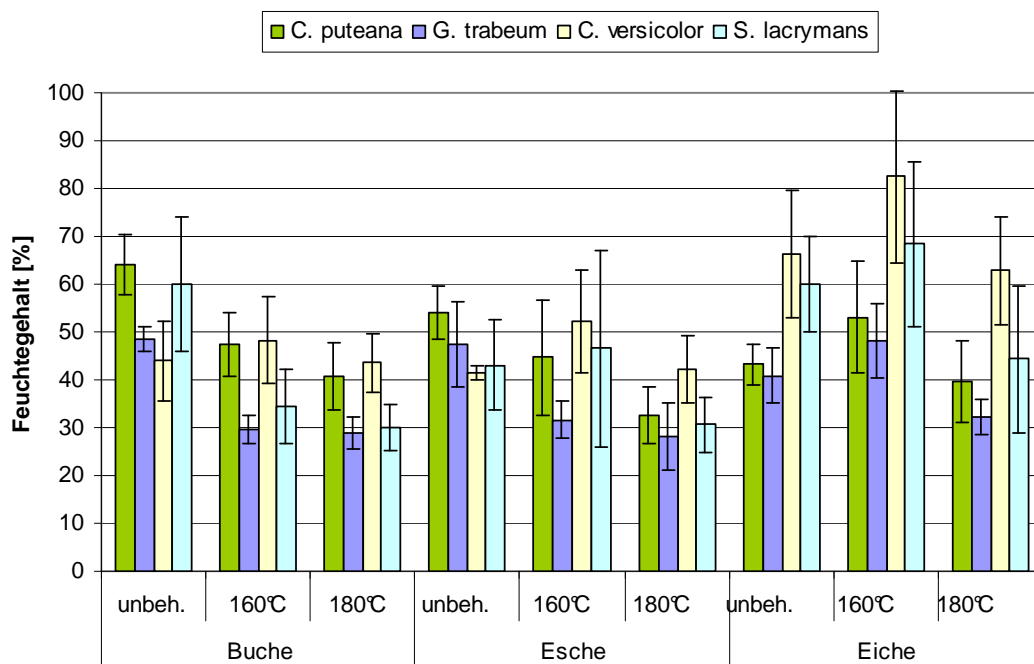


Abbildung 24: Holzfeuchte (%) der Laubhölzer nach 16 Wochen Inkubationszeit. Balken: Standardabweichung.

Feuchtigkeitsgehalt von mindestens 40 bis über 60% (Abbildung 24). Die bei zwei Temperaturstufen durchgeführten Thermobehandlungen führten durchschnittlich zu einer geringfügig niedrigeren Feuchte der Holzproben direkt nach Beendigung der Prüfdauer. Je nach Pilzart zeigte sich jedoch ein uneinheitliches Bild. Einige Pilz-Thermoholz-Kombinationen erreichten oder überschritten auch den Feuchtigkeitsgehalt der unbehandelten Vergleichsproben.

Die Holzfeuchte der getesteten Nadelhölzer lag nach 16 Wochen Inkubationszeit insgesamt gesehen geringfügig höher als die der Laubhölzer, also ebenfalls über dem Fasersättigungspunkt (Ausnahme: Kiefer 180°C mit 28% Feuchte möglicherweise darunter). Wiederum zeigten unbehandelte Proben geringfügig höhere Feuchten, fast man Ergebnisse aller Prüfpilze zusammen. Spitzenfeuchten von über 80% (Einzelwerte sogar bis zu 130%) verursachte überwiegend der Nadelholz-Spezialist (*Poria placenta*), sowohl bei unbehandeltem als auch bei 160° C behandeltem Holz (Abbildung 25).

Ähnlich hohe Werte fand auch KAMDEM et al. (2002) an hitzebehandeltem Laub- und Nadelholz und schlussfolgerte, dass die Thermobehandlung (200-260°C) nicht generell eine Wasserabsorption limitiere. Somit könnte die grundsätzlich verminderte Ausgleichsfeuchte von Thermoholz (ca. 10%) nicht als Erklärung für erhöhte Dauerhaftigkeit herangezogen werden, da Erfahrungswerte unter Laborbedingungen zeigen, dass optimale Holzfeuchten für Holz zerstörende Pilze zwischen 40 und 70% liegen (HUCKFELDT et al. 2005).

Diese auch bei Thermoholz hohen Holzfeuchten stehen im Gegensatz zu Messungen von SCHWARZE und SPYCHER (2005). Sie berichten von Holzfeuchten an thermisch behandeltem Fichtenholz (160°C und 180° C) nach Beendigung der 16-wöchigen Prüffrist, die deutlich unter dem Fasersättigungspunkt lagen, was sie als ungünstige Wachstumsbedingungen für die Braunfäuleerreger gem. EN 113 einstufen. Dennoch wurden Masseverluste für die Thermoholzvarianten zwischen 25-35% erreicht, die trotz niedrigerer Holzfeuchte höher waren als

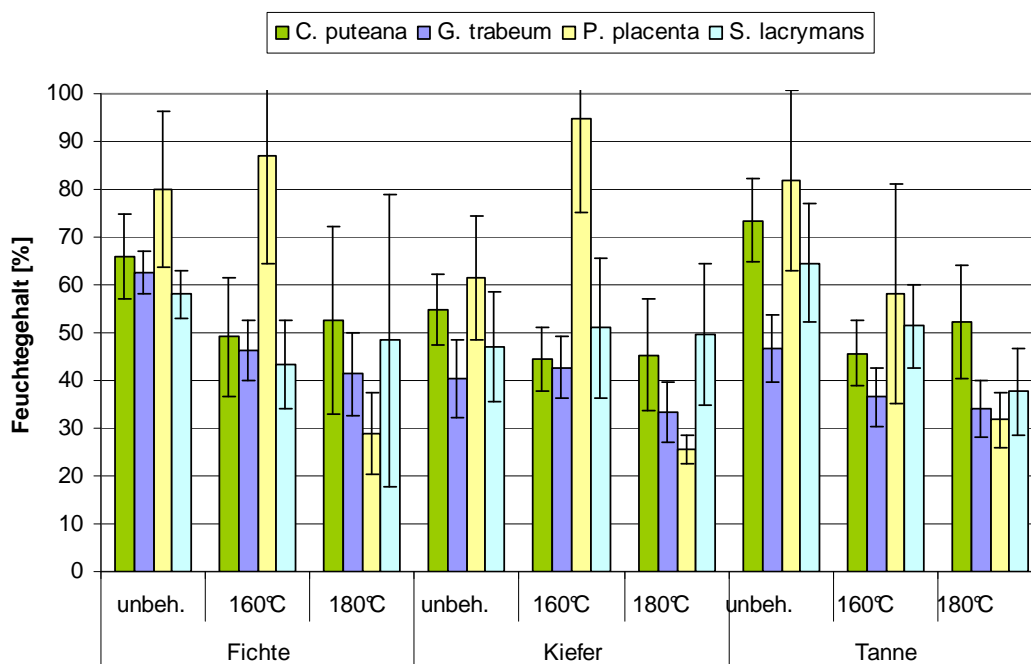


Abbildung 25: Holzfeuchte (%) der Nadelhölzer nach 16 Wochen Inkubationszeit. Balken: Standardabweichung

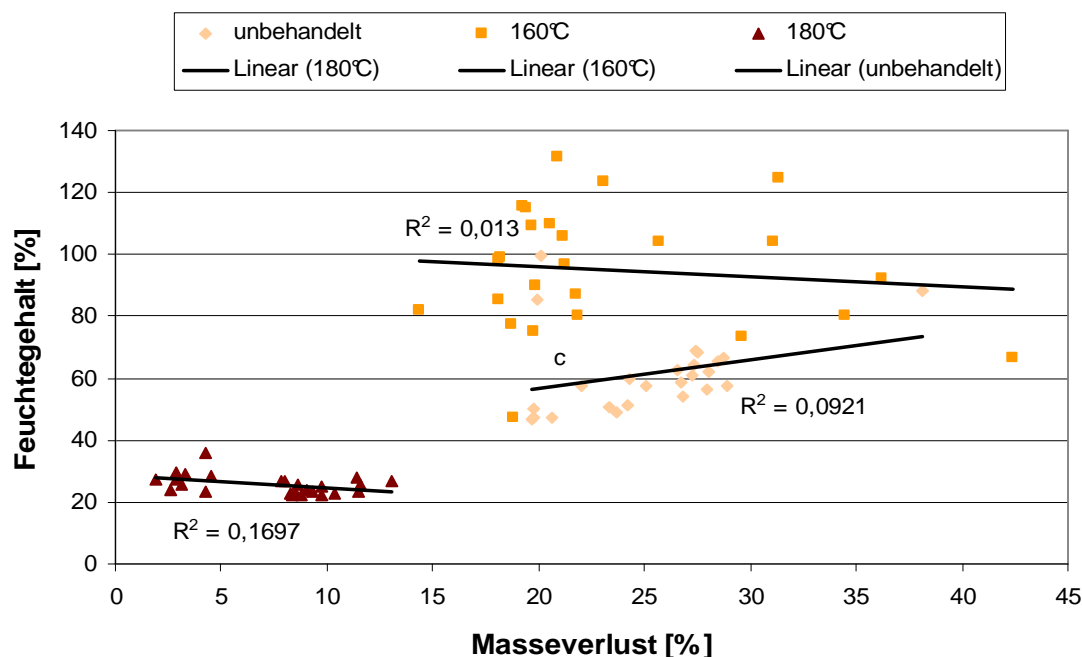


Abbildung 26: Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Masseverlust für Kiefer nach 16 Wochen Bepilzung mit dem Nadelholzspezialist *Poria placenta*

Ergebnisse dieser Untersuchung. Eine generelle Korrelation zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Masseverlust nach 16 Wochen Bepilzung konnte weder bei Laubholz noch bei Nadelholz festgestellt werden. Beispielsweise verursachte *Poria placenta* an Kiefer 180°C einen mehr als doppelt so hohen durchschnittlichen Masseverlust als die übrigen Prüfpilze, obwohl der Feuchtigkeitsgehalt dieser Prüfkörper am niedrigsten war (Abbildung 26). Dahingegen zeigten die Ergebnisse der schwachen Thermobehandlung bei Kiefer beimpft mit *C. puteana* eine sehr gute Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehalt es mit dem Masseverlust (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,88$) während bei gleicher Untersuchungsvariante unter einem anderen Prüfpilz keine lineare Korrelation zustande kam ($R^2 = 0,01$).

Auch in anderen Fällen spiegelte sich ein hoher Masseverlust nicht unbedingt in einem hohen Feuchtigkeitsgehalt oder umgekehrt. Auffallend war jedoch, dass der Balkenblättling (*Gloeophyllum trabeum*) meist die niedrigste Holzfeuchte im Vergleich zu den übrigen Pilzen einstellte. BORREGA et al. (2009) stellte ebenfalls fest, dass mit *Gloeophyllum trabeum* infiziertes thermisch behandeltes Aspenholz geringere Holzfeuchten aufwies als Holz, das mit *C. puteana* beimpft war. Es wird vermutet, dass der Grund hierfür in unterschiedlichen Abbaustrategien der beiden Braunfäuleerreger liegt. BOONSTRA et al. (2006) berichtet, dass Zellulose stärker von *C. puteana* als von *G. trabeum* angegriffen wird. Es wird von den Autoren vermutet, dass durch *C. puteana* ein höherer Anteil von kristalliner Zellulose in amorphe Zellulose umgewandelt wird. Da diese hydrophiler ist als kristalline Zellulose, könnte sich eine durch die pilzliche Transpiration hervorgerufene erhöhte Feuchte einstellen. Eine ausreichende Holzfeuchte gilt als essentiell für das Wachstum der Pilze. Im Allgemeinen ist daher die Fäuleanfälligkeit gegenüber Holz zerstörenden Pilzen umso größer, je höher die Holzfeuchte ist. Zum Beispiel fanden VIITANEN und PAAJANEN (1988) heraus, dass eine Mindestholzfeuchte von 25% für das Wachstum von *C. puteana* erforderlich ist. Tatsächlich korrelierte der Masseverlust der mit *C. puteana* bzw. *G. trabeum* bepilzten Prüfkörper in etwa mit der dazu gemessenen Holzfeuchte (Abbildung 26 und Abbildung 27). Die Differenz der Holz-

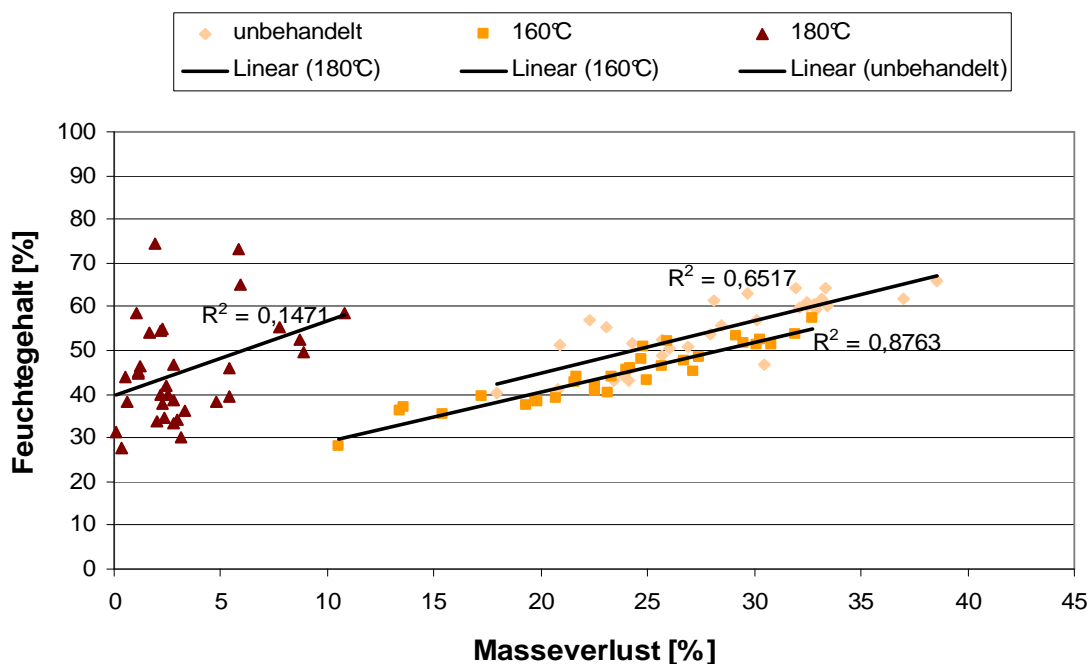


Abbildung 27: Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Masseverlust für Kiefer nach 16 Wochen Be-
pflanzung mit dem Braunen Kellerschwamm (*Coniophora puteana*)

feuchte zwischen den beiden Prüfpilzen spiegelte sich bei allen Holzarten in der unbehandelten und schwachen Thermovariante auch im jeweiligen Masseverlust. Bei der stärkeren Thermobehandlung stimmte dieser Trend allerdings nicht überein.

3.2.4 Effekt der Auswaschung nach EN 84

Die Frage, ob eine Auswaschung der Prüfkörper gemäß EN 84 vor dem Basidiomyceten-Test einen Effekt auf den Masseverlust bzw. die Pilzresistenz der Prüfkörper hat, wurde anhand ausgewaschener und nicht ausgewaschener Holzproben getestet. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 dargestellt. Buche zeigte für jede Untersuchungsvariante einen höheren Masseverlust bei Prüfkörpern, die zuvor keiner Auswaschung unterzogen wurden. Die Differenz der erzielten Masseverluste mit bzw. ohne Auswaschung betrug bei unbehandelter und stark thermisch behandelter Buche nur wenige Prozentpunkte. Ein anderes Bild ergab sich für Eiche. Es wurden nur 2 Untersuchungsvarianten getestet (unbehandelt, TH 160°C), jedoch zeigten hier die zuvor ausgewaschenen Prüfkörper einen höheren Masseverlust. Im Fall der unbehandelten Eiche war dieser Unterschied hochsignifikant und betrug mehr als das Doppelte im Vergleich zur unausgewaschenen Variante (12 % vs. 29 % MV). Eine Unterscheidung in Holzzonen ergab sowohl für Buche als auch für Eiche kein wesentlich anderes Ergebnis und ist daher nicht dargestellt.

Der Effekt der Auswaschung auf den Masseverlust der Kiefer lässt sich nicht einheitlich beantworten. Während unbehandelte Proben als auch 180°C C behandeltes Splintholz ohne Auswaschung stärker angegriffen wurden, zeigte die schwache Thermovariante als auch Kern 180°C in ausgewaschener Form eine schwächere Pilzresistenz, d.h. einen höheren Masseverlust. Allgemein war die Diskrepanz im Masseverlust zwischen unausgewaschenen und ausgewaschenen Proben bei Kiefern Splintholz deutlicher ausgeprägt als bei Kernholz. Dies ist

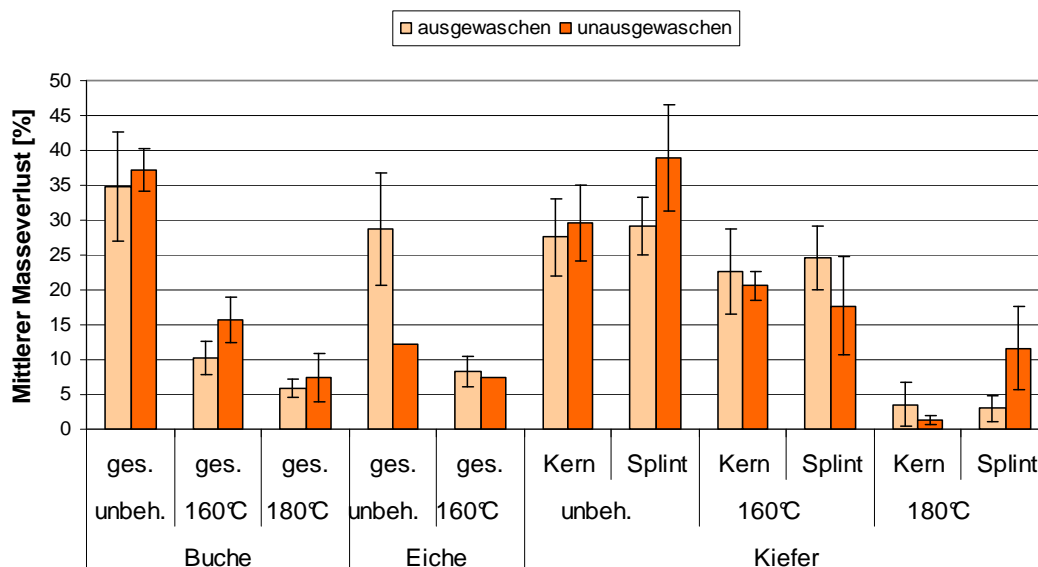


Abbildung 28: Vergleich der mittleren Masseverluste von gemäß EN 84 ausgewaschenen Prüfkörpern und zuvor nicht ausgewaschenen Prüfkörpern nach 16 Wochen Inkubationszeit. Buche und Eiche waren *C. versicolor*, Kiefer war *C. puteana* ausgesetzt. (ges. = Kern und Splint)

überraschend, da auswaschbare sekundäre Pflanzenstoffe, die zur Erhöhung der Pilzresistenz beitragen könnten, vor allem im Kern vorhanden sind und somit der Effekt einer Auswaschung unabhängig von der Untersuchungsvariante vorrangig im Kernholz vermutet wurde. Allerdings zeigte sich, wie schon erwähnt, ein solcher Unterschied zwischen Kern- und Splintholz nicht im Fall der Eiche, die ebenfalls ein ausgeprägter Kernholzbildner ist.

3.2.5 Einstufung in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen

EN 305-1 definiert „natürliche Dauerhaftigkeit“ als die dem Holz eigene Widerstandsfähigkeit gegen einen Angriff durch Holz zerstörende Organismen. Sie kann durch Freiland- oder Laborversuche bestimmt werden. Grundsätzlich sind Freilandversuche aufgrund ihrer realistischeren Versuchsbedingungen vorzuziehen, jedoch benötigen sie Jahre bis Jahrzehnte bevor sich brauchbare Ergebnisse evaluieren lassen. Dahingegen erlauben Laborversuche in relativ kurzer Zeit erste Ergebnisse. Es besteht jedoch das Problem, inwieweit die Erkenntnisse die natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes unter natürlichen Bedingungen im jeweiligen Gebrauch widerspiegeln.

Auf Grundlage vorgenannter Ergebnisse wurde eine vorläufige Einstufung der nach EN 113 geprüften Holzproben in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen (DHK) nach EN 350-1 und CEN/TS 15083-1 vorgenommen (Tabelle 16). Es sei darauf hingewiesen, dass die Klassifikation der Masseverlust-Ergebnisse in DHK bei genannten Normen auf unterschiedliche Art und Weise erfolgt. Die vorläufige Einstufung der Dauerhaftigkeit nach CEN/TS 15083-1 wurde von VAN ACKER et al. (2003) vorgeschlagen und basiert auf dem Prüfpilz, der den höchsten mittleren Median-Masseverlust [%] an den Test-Prüfkörpern verursacht. Gewichtsverluste von Vergleichs-Prüfkörpern spielen keine Rolle.

Dahingegen wird die Einstufung gemäß EN 350-1 anhand eines errechneten x-Wertes vorgenommen. Er charakterisiert das Verhältnis des mittleren korrigierten Masseverlustes der Prüf-

Tabelle 16: Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz gegen Pilzbefall aufgrund von Laborversuchen auf der Basis von EN 113 bzw. EN 350-1 und CEN/TS 15083-1

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	Median MV [%] (CEN/TS 15083-1)	x-Wert (EN 350-1/EN 113)
1	sehr dauerhaft	<5	$\leq 0,15$
2	dauerhaft	5 bis <10	$> 0,15 \leq 0,3$
3	mäßig dauerhaft	10 bis <15	$> 0,3 \leq 0,6$
4	wenig dauerhaft	15 bis <30	$> 0,6 \leq 0,9$
5	nicht dauerhaft	>30	$> 0,9$

Probekörper zum mittleren Masseverlust der Vergleichs-Probekörper. Dabei sollte laut Norm die Berechnung des x-Wertes auf jener Pilzart beruhen, die den größten mittleren Masseverlust an den Prüf-Probekörpern verursacht. Dieser Prüfpilz muss jedoch nicht zwangsläufig auch der aggressivste Holzzerstörer an den Vergleichs-Probekörpern sein. Bellmann 1988b stellt daher die Frage, ob es ratsam ist, bei den Vergleichs-Probekörpern auch den Gewichtsverlust des Prüfpilzes in die Gleichung einzusetzen, der bei der Testholzart den höchsten Masseverlust verursacht. Da im Allgemeinen jedoch der aggressivste Pilz für eine Einstufung der Dauerhaftigkeit herangezogen wird, sollte dies auch für Vergleichs-Hölzer gelten. Aus diesem Grund wurde in vorliegender Untersuchung auch bei den Vergleichs-Prüfkörpern auf den Pilz mit der höchsten Abbauleistung bei der Berechnung des x-Wertes zurückgegriffen.

Die thermische Behandlung führte bei den Prüfholzarten grundsätzlich zu einer Steigerung der natürlichen Dauerhaftigkeit sowohl für die durchgeführten Agarblocktests (Tabelle 17) als auch für die Erdkontaktversuche (Abbildung 29). Insbesondere die stärkere thermische Behandlung (180°C) bewirkte eine deutliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit bis in DHK 2 (dauerhaft) und zum Teil auch in DHK 1 (sehr dauerhaft). Beispielsweise änderte sich die Klassifikation von Buche und Tanne nach thermischer Behandlung bei 180°C von ursprüng-

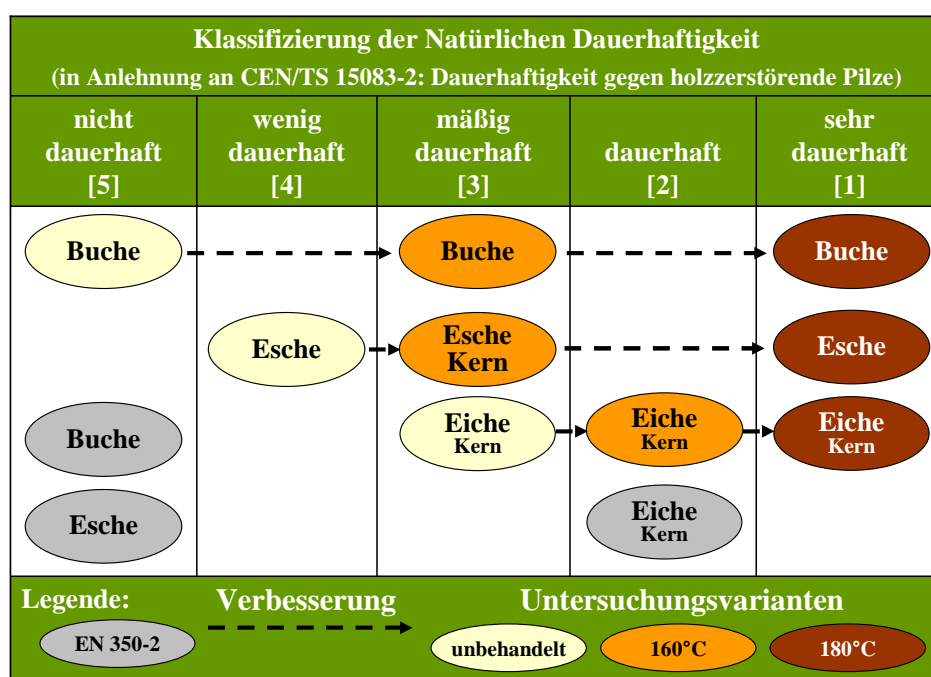


Abbildung 29: Einstufung der Untersuchungsvarianten in Dauerhaftigkeitsklassen gemäß CEN/TS 15083-2; EN 350-2: langjährige Erfahrungswerte zur Dauerhaftigkeit von unbehandeltem Holz

Tabelle 17: Vergleich der Einstufung der Untersuchungsvarianten in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen anhand des höchsten Median Masseverlustes (MV) nach CEN/TS 15083-1 bzw. des höchsten mittleren Masseverlustes nach EN 113

Baumart	Variante	Zone	CEN/TS 15083-1		EN 350-1 (EN 113)		
			Median MV [%]	DHK	mittl. MV [%]	x-Wert	DHK
Buche	unbehandelt	Kern + Splint	36,9	5	35,5	1,00	5
	160°C	Kern + Splint	10,9	3	8,2	0,23	2
	180°C	Kern + Splint	6,1	2	3,8	0,11	1
Esche	unbehandelt	Kern	32,0	5	29,9	0,84	4
		Übergang	32,8	5	31,5	0,89	4
		Splint	32,4	5	30,9	0,87	4
	160°C	Kern	9,2	2	5,0	0,14	1
		Übergang	10,6	3	6,8	0,19	2
		Splint	13,0	3	8,6	0,24	2
	180°C	Kern	4,3	1	2,1	0,06	1
		Übergang	4,3	1	2,2	0,06	1
		Splint	4,0	1	1,5	0,04	1
Eiche	unbehandelt	Kern	32,6	5	25,7	0,72	4
		Übergang	28,8	4	25,8	0,73	4
	160°C	Kern	9,5	2	9,2	0,26	2
		Übergang	9,7	2	6,8	0,19	2
	180°C	Kern	3,9	1	3,5	0,10	1
		Übergang	3,3	1	1,0	0,05	1
Kiefer	unbehandelt	Kern	27,3	4	26,0	0,87	4
		Splint	39,1	5	29,8	1,00	5
	160°C	Kern	24,4	4	19,3	0,65	4
		Splint	25,6	4	19,2	0,64	4
	180°C	Kern	7,9	2	4,5	0,15	1
		Splint	8,5	2	4,9	0,17	2
Fichte	unbehandelt	Kern	38,9	5	34,7	1,16	5
		Splint	39,2	5	34,3	1,15	5
	160°C	Kern	25,3	4	21,0	0,70	4
		Splint	24,5	4	20,9	0,70	4
	180°C	Kern	13,3	3	10,8	0,36	3
		Splint	8,9	2	5,7	0,19	2
Tanne	unbehandelt	Kern	34,4	5	33,2	1,11	5
		Splint	40,9	5	39,0	1,31	5
	160°C	Kern	24,0	4	22,5	0,75	4
		Splint	18,8	4	15,8	0,53	3
	180°C	Kern	1,9	1	0,8	0,03	1
		Splint	2,5	1	1,4	0,05	1

lich „nicht dauerhaft“ (DHK 5) zu „sehr dauerhaft“ (DHK 1). Ein Vergleich der Einstufungen in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen gemäß EN 350-1 (EN 113) und gemäß der vorläufigen CEN/TS 15083-1 offenbart teilweise abweichende Ergebnisse. Diese sind überwiegend auf das unterschiedliche mathematische Berechnungsverfahren zurückzuführen. Tendenziell scheint das vorläufige Verfahren nach CEN/TS 15083-1 zu einer konservativeren Einschätzung der Dauerhaftigkeit zu führen. Die Unterscheidung der Dauerhaftigkeit (wo zutreffend) betrug jedoch maximal eine Klasse. Eine Variabilität von plus/minus einer DHK kann trotz gleicher Berechnungsmethode durchaus auftreten wie parallele Untersuchungen in verschiedenen Laboratorien mit vielen Baumarten zeigten (VAN ACKER et al. 1996). Welches Testverfahren eine „aussagekräftigere“ DHK ergibt, wird sich letztendlich wohl nur durch Praxis-einsätze oder weitere Freilandversuche beantworten lassen.

Anzumerken ist weiterhin, dass eine Berechnung des x-Wertes beruhend allein auf der aggressivsten Pilzart der Prüf-Probekörper, d.h. beruhend auf MV-Ergebnissen der gleichen Pilz-

zart bei Prüf- und Vergleichsproben, zu einer ebenfalls konservativeren Einstufung führt. Somit würden sich in vier Fällen die DHK nach CEN/TS 15083-1 bzw. EN350-1 gleichen (Esche Splint bzw. Übergang unbehandelt, Kiefer Kern 180°C-behandelt und Tanne Splint 160°C-behandelt), in drei Fällen wären die getesteten Hölzer nach EN 350-1 sogar um eine DHK schlechter einzustufen. Ein Vergleich der erzielten Dauerhaftigkeitsklassen einzelner Holzarten unter Anwendung unterschiedlicher Modifikationsverfahren (thermischer Art oder chemischer Natur) sollte also immer die Kenntnis des Berechnungsverfahrens, das zur Einstufung in die jeweilige DHK geführt hat, voraussetzen. Der Gebrauch verschiedener Berechnungsverfahren kann bei gleichen Testergebnissen für eine Holzart leicht eine Variation von 1 bis 2 DHKs bewirken. Dies sollte im Dauerhaftigkeitsvergleich von verschiedenen modifizierten Hölzer entsprechend berücksichtigt werden.

3.3 Zusammenfassende Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der holzbiologischen Versuche zeigen generell eine erhöhte Resistenz des thermisch behandelten Holzes gegenüber unbehandeltem Holz gegen Holz zerstörende Pilze. Dabei bestimmt die Behandlungstemperatur maßgeblich die Stärke der Resistenzverbesserung. Je höher die Temperatur, desto größer ist die erzielte Dauerhaftigkeit. Dies ist von vielen anderen Verfahren zur thermischen Behandlung bekannt (MAZELA et al. 2004, BOONSTRA und TJEERDSMA 2006, PAUL et al. 2007). Stärker modifiziertes Thermoholz (180°C) der untersuchten Holzarten wies signifikant weniger Masseverlust auf als unbehandelte Vergleichsproben. Der Wirkungsgrad betrug für alle stark modifizierten Testhölzer zwischen 61 und 93%. Die schwächere Thermobehandlung (160°C) erreichte tendenziell eine verminderte Wirkungsintensität. Dies machte sich insbesondere bei den getesteten Nadelhölzern bemerkbar, während schwach modifiziertes Laub-Thermoholz schon eine deutlich verbesserte Pilzresistenz zeigte. Der Wirkungsgrad der drei getesteten Nadelhölzer lag zwischen 21 und 55%, wobei Kiefern Kernholz mit lediglich 11% Behandlungseffizienz der schwachen Thermobehandlung auffallend schlecht abschnitt. Die 160°C-Behandlung von Buche, Eiche und Esche erzielte einen recht einheitlichen Wirkungsgrad zwischen 58 – 67%. Je nach Holzart und beabsichtigtem Verwendungszweck reicht also eine Behandlung bei 160°C aus, um positive Eigenschaftsänderungen wie eine erhöhte Pilzresistenz bzw. verringerte Feuchtaufnahme und damit verbesserte Dimensionsstabilität zu erreichen.

Der Prüfpilz *Serpula lacrymans* gilt als einer der gefährlichsten Holzzerstörer in Europa. Er tritt an vielen verschiedenen Holzarten auf und zeigt eine sehr unterschiedliche Zerstörungsintensität (WÄLCHI 1973). Sowohl in EN 113 als auch in CEN/TS 15083-1 wird er trotzdem nicht als obligatorischer Prüfpilz genannt. Er wurde als zusätzlicher Testpilz in die Versuchsreihe aufgenommen, da er gemäß EN 350-1 für Laub- und Nadelholz als Prüfpilz aufgelistet ist. Im Gegensatz zu den obligatorischen Prüfpilzen enthält keine der Normen für *Serpula lacrymans* Mindestmasseverluste, die an unbehandelten Virulenzprüfkörpern auftreten sollten. Aus Untersuchungen von WÄLCHLI (1973) und BELLMANN (1988b) ist jedoch bekannt, das *Serpula lacrymans* Abbauraten von bis zu 60% innerhalb von 18 Wochen verursachen kann. Die Abbauraten des Pilzes an unbehandelten und thermisch modifizierten Holzproben dieser Untersuchung waren bis auf Fichte und Kiefer ungewöhnlich niedrig. Masseverluste an Buche, Eiche, Esche und Tanne lagen lediglich im einstelligen Bereich. Gründe für diese Anomalität können nur vermutet werden. Grundsätzlich reagiert *Serpula lacrymans* sehr

empfindlich auf zu große Klimaschwankungen oder Luftbewegungen. Dieser Einfluss sollte jedoch aufgrund der eingestellten Klimakammer zumindest während der Prüffrist ausgeschlossen werden können. Weiterhin könnte die Virulenz des Pilzes zu schwach gewesen sein. Schon bei der Anzucht des Pilzes kam es zum Teil zu Wachstumsstockungen. Aus Erfahrungen anderer Prüfinstitute ist bekannt, dass dieser Pilz schwierig im Labor zu kultivieren ist (VAN ACKER et al. 2003). Allerdings zeigen unbehandelte Virulenzprüfkörper der getesteten Baumarten (außer Eiche), die mit diesem Pilz beimpft waren, Masseverluste im zweistelligen Bereich (17-35%), wenn auch diese im Vergleich mit Ergebnissen von WÄLCHLI (1973) und BELLMANN (1988b) relativ niedrig ausfielen. Allerdings weist BELLMANN (1988a und b) ausdrücklich darauf hin, dass Resistenzergebnisse mehrerer Autoren trotz gleicher Prüfbedingungen, Probengrößen und Pilzart bei derselben Holzart voneinander abweichen können, wenn verschiedene Pilzstämme mit unterschiedlichem Abbauvermögen eingesetzt wurden. Weiterhin nimmt eine Vielzahl anderer Faktoren auf die Fäule-Resistenz von Testhölzern in Laborversuchen Einfluss und erschwert einen literaturübergreifenden Vergleich von MV-Ergebnissen äußerst. Eine wesentliche Einflussgröße ist die Berechnungsmethode des Masseverlustes, auf die oben bereits näher hingewiesen wurde. Selbst Untersuchungen mit identischen Pilzstämmen und gleichem Prüfungsverfahren ergaben bei VAN ACKER et al. (2003) signifikante Resistenzunterschiede im mittleren Masseverlust. Die Ursache für die ungewöhnlich niedrigen Masseverluste von *Serpula lacrymans* können an dieser Stelle also nicht eindeutig geklärt werden. Nichtsdestotrotz war er ausschlaggebender Prüfpilz bei der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit unbehandelter Fichte und unbehandeltem Kiefernspaltholz.

Die hier erzielten Ergebnisse basieren auf standardisierten Labortests zur Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit aufgrund von ermittelten Masseverlusten nach Pilzangriff. Untersuchungen von BRISCHKE et al. (2008) zeigten allerdings, dass die alleinige Betrachtung des Masseverlustes nach Pilzbefall die strukturelle Integrität des Holzes unzureichend widerspiegelt. Selbst bei keinem oder sehr niedrigem Masseverlust durch Pilzangriff kam es zu beträchtlichen strukturellen Veränderungen im Holz, was sich in einem deutlich reduzierten Widerstand gegen Schlagbeanspruchung äußerte (Reduktion von 22 bis 36% bei nur 3% MV). Die verminderte Festigkeit in multiplen Schlagprüfungen wurde damit erklärt, dass die Degradation von Zellwandpolymeren bereits beginnt bevor Holzabbau im Sinne von Holzzersetzung stattfindet. Bei der Interpretation der in dieser Studie gewonnenen Dauerhaftigkeitsergebnisse sollte also trotz der nur geringen Masseverluste des stärker modifizierten Thermoholzes (180°C) die wahrscheinlich reduzierte Schlagfestigkeit des Holzes bei seiner Verwendung berücksichtigt werden.

Weiterhin ist zu bedenken, dass der auf das Ausgangsgewicht bezogene prozentuale Masseverlust zu einer nur scheinbar höheren Pilzresistenz bei Hölzern mit relativ hoher Rohdichte führen kann (WILLEITNER 1984, BELLMANN 1988a). Es ist allgemein üblich, Ergebnisse von Resistenzuntersuchungen gegenüber Holz zerstörenden Pilzen als prozentuale Masseverluste auszudrücken. Nach NILSSON und DANIEL (1992) ist diese Praxis eine gute Methode, um die Dauerhaftigkeit verschiedener Holzarten (selbst unterschiedlicher Dichte) miteinander vergleichen zu können, da schwere Hölzer dauerhafter sind als leichte. Dies ergibt sich daraus, dass bei Hölzern mit hoher Dichte (bei gleicher Prüfkörpergröße) mehr Holzmasse zu Beginn des Versuchs zur Verfügung stehen als bei leichteren Hölzern. Vorausgesetzt es wird die gleiche Menge Holz während eines Versuchszeitraumes abgebaut, ergibt sich dann bei ei-

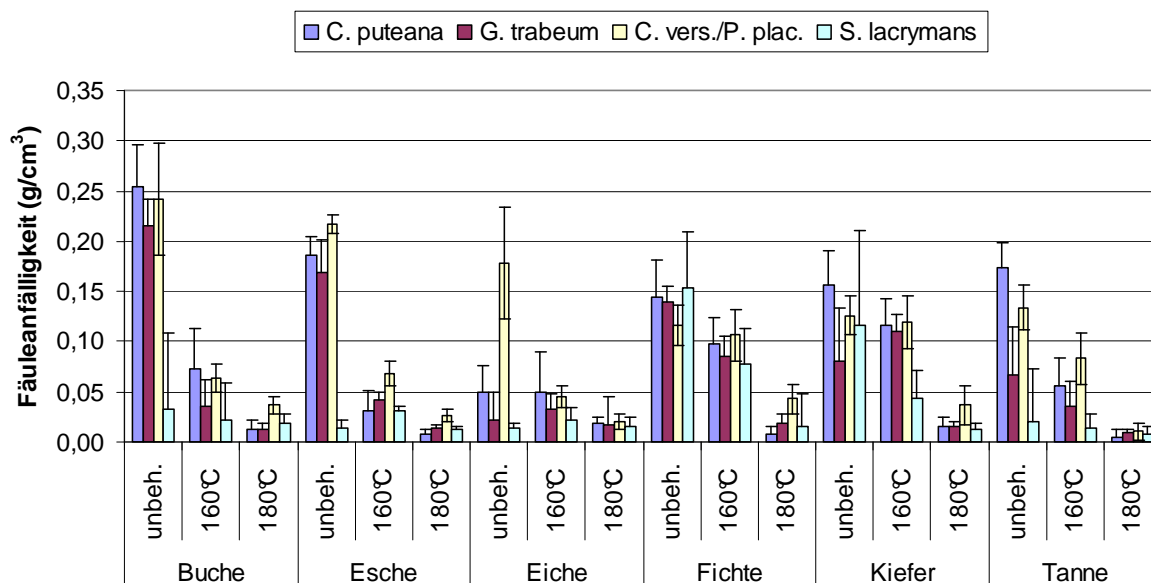


Abbildung 30: Fäuleanfälligkeit der getesteten Holzarten nach 16 Wochen Inkubationszeit

nem höheren Ausgangsgewicht ein prozentual kleinerer Masseverlust, d.h. eine erhöhte Dauerhaftigkeit. Auch eine vergleichende Studie von VAN ACKER et al. (2003) kam zu dem Ergebnis, dass prozentuale Masseverluste für die Beschreibung der natürlichen Dauerhaftigkeit nützlicher waren als absolute Werte.

Schwierigkeiten ergeben sich allerdings, wenn Hölzer unterschiedlicher Dichte hinsichtlich ihrer Fäuleanfälligkeit (decay susceptibility) verglichen werden sollen. So mag der prozentuale Masseverlust bei schweren Hölzern zwar niedriger sein als der bei leichteren, der absolute Gewichtsverlust in g jedoch höher. In vorliegender Untersuchung war dies zum Beispiel bei unbehandeltem Eschenholz der Fall. Der Prüfpilz *Coniophora puteana* verursachte einen Masseverlust von 29% (alle Zonen zusammen). Im Gegensatz dazu wies unbehandeltes Tannenholz beim gleichen Testpilz einen um 10% höheren MV auf (39%). Betrachtet man die absoluten Gewichtsverluste pro Volumeneinheit, wurde Tanne 0,173 g/cm³ abgebaut, Esche hingegen 0,186 g/cm³ (Abbildung 30). Auf ein Kubikmeter Holz bezogen, hätte Esche während der 16 Wochen Inkubationszeit somit 13 kg mehr Holzsubstanz verloren als Tanne. Der niedrigere prozentuale MV täuscht daher eine nur scheinbar erhöhte Pilzresistenz vor. Dies liegt an den unterschiedlichen Dichten der beiden Holzarten. Während unbehandelte Tannenprüfkörper eine errechnete durchschnittliche Darrdichte von 443 kg/m³ hatten, waren es bei unbehandelter Esche 644 kg/m³. Die Betrachtung des Holzabbaus pro Volumeneinheit (g/cm³ oder kg/m³) erlaubt somit eine bessere Einschätzung der Zersetzungsaktivität eines Holz zerstörenden Organismus als der prozentuale Masseverlust (NILSSON und DANIEL 1992). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Abbaurate neben der gegebenen Prüffrist von vielen weiteren Prüffaktoren abhängt und somit Resistenzvergleiche unterschiedlicher Untersuchungen stets schwierig bleiben.

Ein Basidiomyceten-Test unter Laborbedingungen bietet die Möglichkeit, in relativ kurzer Zeit zu einer vorläufigen Einschätzung der natürlichen Dauerhaftigkeit von unbekannten Holzarten zu kommen. Nach SCHEIDING et al. (2007) sollte thermisch modifiziertes Holz aufgrund seiner durch die Hitzebehandlung veränderten Eigenschaften als eigene „Holzart“ angesehen werden. Die Frage ist, inwieweit Ergebnisse aus standardisierten Testmethoden wie

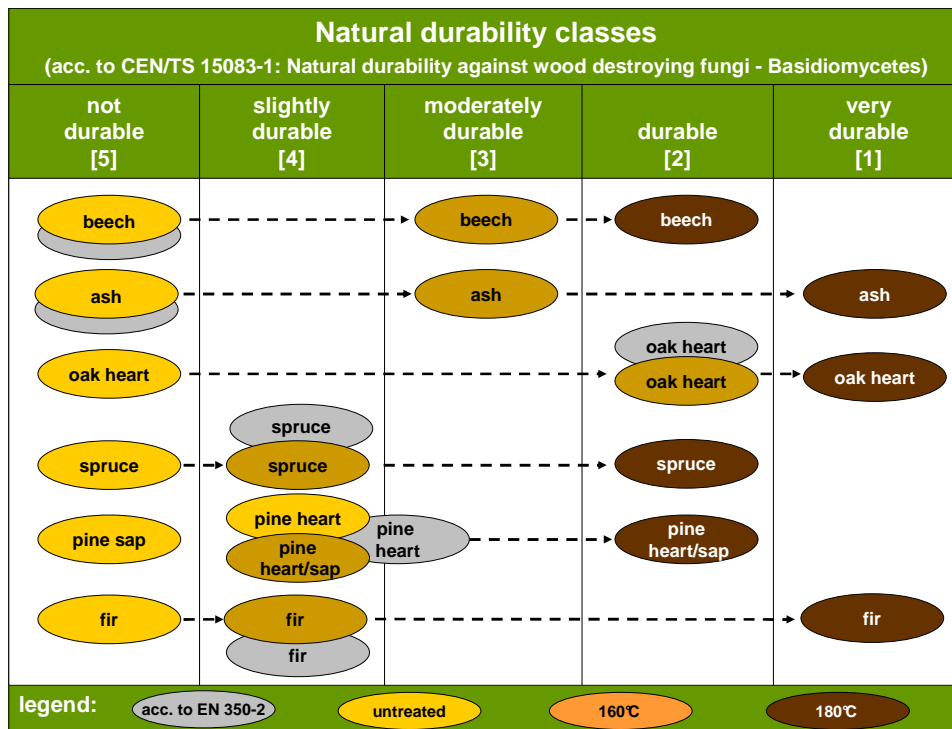


Abbildung 31: Änderung der natürlichen Dauerhaftigkeitsklasse aufgrund thermischer Behandlung der getesteten Holzarten. Die Klassifizierung nach EN 350-2 gibt die Einstufung aufgrund langjähriger Praxiserfahrung wider

EN 113 bzw. CEN/TS 15083-1 eine zutreffende Prognose über die Dauerhaftigkeit des Holzes in Gebrauch geben können. Unter Laborbedingungen wird das zu testende Holz zwar aggressiven Holzerstörern ausgesetzt, jedoch unter Ausschluss jeglicher - unter natürlichen Bedingungen stattfindenden - Interaktionen anderer biotischer und abiotischer Faktoren, die ebenfalls einen Einfluss auf das Leistungsvermögen des neu einzustufenden Holzes haben könnten.

Eine Orientierung der Prognosesicherheit von Labor-Ergebnissen kann ein Vergleich der Klassifizierung unbehandelter Hölzer nach EN 113 bzw. CEN/TS 15083-1 mit der nach EN 350-2 liefern, die die natürliche Dauerhaftigkeit vieler Holzarten aufgrund langjähriger Praxiserfahrung ausweist. Wie in Abbildung 31 ersichtlich, stimmte die nach diesen Laborversuchen sich ergebende DHK für unbehandeltes Holz relativ gut mit den Angaben nach EN 350-2 überein. Eine Abweichung von 1-2 Klassen kann durch unterschiedliche Berechnungsverfahren leicht zustande kommen (VAN ACKER et al. 1999). Die Einstufung von unbehandeltem Eichenkernholz in Klasse 5 weicht um 3 Klassen von der Einschätzung nach EN 350-2 ab. Dies beruht jedoch allein auf den hohen Masseverlusten des Laubholzspezialisten *Coriolus versicolor*. Es wird berichtet, dass eine Klassifizierung der Dauerhaftigkeit aufgrund von Ergebnisse dieses Pilzes manchmal zu einer Einschätzung abweichend dem Verhalten im Freiland führen kann (VAN ACKER et al. 1999). Danach lässt sich vermuten, dass die Testergebnisse der hier getesteten thermisch modifizierten Hölzer die Einstufung ihrer natürlichen Dauerhaftigkeit annähernd gut widerspiegeln. Um jedoch das tatsächliche Verhalten des Thermoholzes unter Witterungseinflüssen im Freiland beurteilen zu können, sollten zusätzliche Langzeitversuche unter schärferen Bedingungen als im eigentlichen Gebrauch von Nöten durchgeführt werden.

3.4 Vergleich der Ergebnisse zu anderen Holzmodifizierungsverfahren

Neben der thermischen Holzmodifizierung existieren seit einigen Jahren auch andere Holzmodifikationsverfahren. Das Ziel aller Verfahren und Technologien ist, die natürliche Dauerhaftigkeit und möglichst auch die Dimensionsstabilität des Holzes zu verbessern. Damit soll weniger dauerhaftes Holz ohne chemischen Holzschutz für den Außenbereich einsatzfähig gemacht werden. Zu den wichtigsten Verfahren zählen neben den kommerziell entwickelten Hitzebehandlungen mit unterschiedlichen Prozessparametern (Temperatur, Medium, Druck, Zeit etc.) (z.B. Stellac-Prozess, Plato-Prozess, OHT-Prozess) chemische Modifikationsverfahren wie die Acetylierung (Accoya wood), Furfuralisierung (Kebony) oder eine Vakuum-Druck-Imprägnierung des Holzes mit der wasserlöslichen Substanz „1,3-dimethylol-4,5-dihydroxyethyl-urea“ (DMDHEU) (Belmadur). Einen ausführlichen Überblick die etablierten Verfahren gibt MILITZ (2002). Ein Vergleich der erreichten Dauerhaftigkeitsklassen zwischen den unterschiedlichen Behandlungstechnologien erscheint nur schwer möglich, da Prüfverfahren, Prüfdauer und Holzarten nicht bei allen Verfahren einheitlich durchgeführt wurden. Dennoch werden exemplarisch Ergebnisse aus Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit anderweitig modifizierter Hölzer kurz dargestellt.

3.4.1 Andere europäische Hitzemodifikationsverfahren

WELZBACHER und RAPP (2002) verglichen die Resistenzen von thermisch veredeltem Holz, hergestellt nach vier bis zur Marktreife entwickelten Prozessen (PLATO, Thermowood, Retified wood und öl-hitzebehandeltes Holz (OHT)). In Miniblocktests wurde die Dauerhaftigkeit gegenüber *Coniophora puteana*, *Poria placenta* und *Coriolus versicolor* für 16 Wochen in Petrischalen getestet. Bis auf PLATO Holz, welches aus Fichte (*Picea abies*) bestand, verwendeten die anderen Verfahren Kiefernholz (*Pinus sylvestris*). Die Klassifikation in Dauerhaftigkeitsklassen erfolgte, wie auch in vorliegender Studie, anhand der relativen Dauerhaftigkeit zum Referenzholz (x-Wert) gemäß EN 350-1, wobei die Klassifikation sowohl auf %-Basis als auch auf g-Basis vorgenommen wurde. Eine Einstufung nach CEN/TS 15083-1 wurde nicht vorgenommen, da sie zum damaligen Zeitpunkt noch nicht existierte. Die Ergebnisse zeigen nur geringe Unterschiede im Masseverlust zwischen den vier thermisch modifizierten Hölzern. PLATO Holz aus den Niederlanden und öl-hitzebehandeltes Holz von Menz Holz aus Deutschland wurden in DHK 2 (dauerhaft) eingestuft, ThermoWood aus Finnland und das französische Retified Wood erreichten DHK 3 (mäßig dauerhaft) bei einer Klassifizierung auf g-Basis. Auf %-Basis änderte sich nur die Einstufung von PLATO Holz von DHK 2 auf 3. BOONSTRA und DOELMAN (1999) klassifizierten PLATO Holz hingegen als dauerhaft bis sehr dauerhaft (DHK 1-2). Auf die große Variabilität in den Ergebnissen zur Dauerhaftigkeit vieler Labor- und Feldversuche zu PLATO Holz weist auch der Hersteller hin. Nach eigenen Angaben wird PLATO Fichtenholz als dauerhaft eingestuft (Klasse 2). Eine Einstufung in Klasse 1 wäre im Vergleich zu Tropenhölzern der Klasse 1 nicht realistisch.

Untersuchungen von SAILER et al. (2000) mit *C. puteana* ergaben für Fichten- und Kiefern-splintholz, welches drucklos in einem 180°-200° C heißen Ölbad behandelt wurde, nach 19-wöchiger Prüfzeit für beide Holzarten eine wesentlich höhere Resistenz als an bei gleichen Temperaturen an Luftatmosphäre behandelten Vergleichsproben. Die Massenzunahme (WPG) der öl-hitzebehandelten Proben betrug 50-70%, der Gewichtsverlust der Proben infol-

ge der Hitzebehandlung an Luftatmosphäre bis zu 10%. Ein 200°C – heißes Ölbad benötigte es, um einen Masseverlust von unter 2% für Kiefernspiltholz festzustellen (nach EN 113 trotz 19-wöchiger Prüfzeit), wohingegen für Fichte 220°C für eine entscheidende Resistenzverbesserung von Nöten waren. Die Autoren halten eine Verwendung des Öl-hitzebehandelten Holzes in Gefährdungsklasse 3 (Außenbau ohne Erdkontakt) und eventuell auch eine Verwendung im Erdkontakt für denkbar.

Eine kürzlich vorgenommene Evaluierung des finnischen ThermoWood im Langzeitgebrauch bestätigte frühere Forschungsergebnisse bezüglich der guten natürlichen Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität des Holzes. Es wird berichtet, dass es besser als erwartet, die Anforderungen im jeweiligen Endgebrauch erfüllte (ALA-VIIKARI und MAYES 2009). Grundsätzlich wird bei dem patentierten Prozess zwischen verschiedenen Behandlungsklassen unterschieden: Thermo-S (190°C +/- 3°C) und Thermo-D (212°C +/- 3°C) für Nadelholz und Thermo-S (185°C +/- 3°C) und Thermo-D (200°C +/- 3°C) für Laubholz. In Klasse-Thermo-D erreicht Nadelholz DHK 2 und Laubholz DHK 1. Die Kategorie Thermo-S wird als mäßig dauerhaft (Klasse 3) eingestuft und vorzugsweise für den Innenausbau verwendet (ITWA, 2009).

3.4.2 Thermische Modifikation unter Stickstoff-Atmosphäre

DIROL und GUYONNET (1993) untersuchten die Fäuleresistenz von Holz, das mit dem in Frankreich angewendeten Retifikationsverfahren modifiziert worden war. Die Behandlung erfolgte bei 250°C unter einer Stickstoffatmosphäre. Dauerhaftigkeitsuntersuchungen gegen Weißfäule (*C. versicolor*) und Braunfäule (*G. trabeum* und *C. puteana*) gemäß der französischen Norm NF-X 41-555 zeigten nach 6 Wochen praktisch keine Fäule an Birken-, Fichten- und Tannenproben, sodass von einer sehr hohen Dauerhaftigkeit ausgegangen wurde. Andere Studien mit retifiziertem Holz, welches mit Temperaturen im Bereich von 220°C bis 260°C behandelt wurde, testeten die Resistenz gegenüber dem Braunfäuleerreger *Serpula lacrymans* - ein Prüfpilz, der ebenfalls in dieser Studie getestet wurde. Nach 5-monatiger Prüffrist ergaben sich sehr geringe Masseverluste an Proben, die mit 250°C und 260°C behandelt wurden. Mit niedrigeren Temperaturen behandeltes Holz war jedoch weniger resistent (TROYA und NAVARETTE, 1994).

3.4.3 Acetyliertes Holz (Accoya Holz)

Die Acetylierung von Holz mit Essigsäureanhydrid zur Verbesserung seiner Eigenschaften ist seit langer Zeit bekannt. Die Kommerzialisierung des Prozesses führte zur Markteinführung von acetylierter Monterey-Kiefer (*Pinus radiata*), bekannt unter dem Handelsnamen AccoyaTM. Eine Vielzahl von Labor- und Feldversuchen über die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität wurden bisher durchgeführt. Ein „L-joint“ Test im Freiland zeigte nach 9 Jahren keine Fäule an acetyliertem Holz. Es ließ sich über den gesamten Querschnitt die höchste Dauerhaftigkeitsklasse (sehr dauerhaft) erreichen (Alexander 2007). Ein weiterer Freilandversuch nach EN 252 offenbarte, dass Kiefer mit einem Acetylgehalt von 22% nach 15 Jahren genauso dauerhaft war als hochdosiertes CCA-behandeltes Holz (10,3 kg/m³) (BRELID und WESTIN, 2007). Vergleichsweise erzielte Kiefern-Thermoholz (*Pinus sylvestris*) nach dem WTT-Verfahren bei der stärkeren Temperaturbehandlung von 180°C die DHK 2 (dauerhaft) im Basidiomycetentest und ebenfalls Klasse 1 im Erdkontakttest. Andere Untersuchungen

zeigten relativ einheitlich, dass ein durch die Acetylierung verursachter Massezusatz (WPG) im Bereich von 18-20% notwendig ist, um acetyliertes Holz vor Braunfäule zu schützen (MV < 3%). Ein Schutz vor Weißfäule lässt sich bei Nadelholz bereits bei unter 10% WPG erreichen, Laubholz bedarf hingegen einer stärkeren Modifizierung von ca. 20% WPG (Hill et al. 2006, 2007). Zum Beispiel zeigte sich bei Kiefernsplintholz (*P. nigra*), das mit verschiedenen Fettsäureanhydriden (u.a. auch Essigsäure) veredelt wurde, ein vollständiger Schutz mit einem Massezusatz von 18% (Papadopoulos und Hill 2002). An acetyliertem Laubholz (*Betula maximowiczii*), welches mit einem Braunfäuleerreger infiziert wurde, trat wenig Masseverlust bei 10% WPG und kein Masseverlust bei 20% WPG auf. Der Masseverlust durch den Abbau des Weißfäulepilzes *C. versicolor* reduzierte sich stetig mit steigendem WPG und erreichte 0% bei einem durch die Acetylierung bedingten Massezusatz von ca. 12% (Ohkoshi et al. 1999). Auf einen annähernd gleichen Grenzwert kamen HILL et al. (2009) bei Buche (*Fagus sylvatica*): Braunfäule durch *C. puteana* wurde bei einem Massezusatz von 17-20 % durch Acetylierung mit Essigsäureanhydrid oder Hexanoic-Anhydrid verhindert. In keiner der letztgenannten Quellenangaben wurden die spezifischen Fäuleresistenzen Dauerhaftigkeitsklassen zugeordnet, aber die Ergebnisse zeigen, dass mittels Acetylierung ein Holzschutzgrad erreicht werden kann, der vergleichbar mit herkömmlichen Holzschutzmitteln ist. Allerdings weist HILL et al. (2006) auch darauf hin, dass höhere Modifizierungsgrade zwar keinen signifikanten Masseverlust innerhalb der 16-wöchigen Prüffrist zuließen, es aber Fälle gab, bei denen ein progressiver Masseverlust nach dieser Zeit stattfand. Die für einen ausreichenden Schutz genannte Acetylierungsintensität hängt also sowohl von der Inkubationszeit ab, als auch vom verwendeten Pilzstamm, wie sich weiterhin herausstellte. An dieser Stelle soll noch einmal erwähnt werden, dass in dieser Untersuchung ebenfalls eine verlängerte Prüfdauer zu weiter steigenden Masseverlusten sowohl bei unbehandeltem Holz als auch bei thermisch modifiziertem Holz geführt hat (vgl. Abbildung 22).

3.4.4 Furfuralisierung (Kebony Holz, VisorWood)

Die Kommerzialisierung des Holzmodifizierungsprozesses mittels Furfurylalkohol (FA) führte zu zwei Produktlinien mit unterschiedlichen FA-Konzentrationen: VisorWood (Nadelholz, WPG zwischen 20-50%) und Kebony (hauptsächlich Laubholz, WPG zwischen 30-100%). Labortests an Kiefer und Buche mit dem Braunfäulepilz *Poria placenta* und einem Weißfäulepilz (*Phanerochaete chrysosporium*) zeigten eine hohe Resistenz (MV<3%) gegen beide Fäuletypen bei sehr hoher (WPG > 120) und moderater FA-Konzentration. Dies würde Dauerhaftigkeitsklasse I (sehr dauerhaft) entsprechen. Niedrigere Modifizierungslevel (WPG 25-30%) führten zu höheren Masseverlusten, die etwas über dem Masseverlust von CCA-behandelten Proben lagen (LANDE et al. 2004). Insgesamt ergab sich eine bessere Resistenz gegenüber Weißfäule-Erregern.

Weiterhin wird laut Verkaufsprospekt von Kebony ASA furfurylierte Buche, Esche und Kiefer als sehr dauerhaft eingestuft. Eine Studie über Kiefer (*P. sylvestris* u. *P. radiata*), die mit einem Prepolymer von Furfuralalkohol behandelt wurde, bestätigte die erhöhte Dauerhaftigkeit als Ergebnis der Furfuralisierung in einem 72-wöchigen Erdkontakttest nach EN 807 und in einem 6-wöchigen Basidiomycetentest mit *C. puteana*. Eine Behandlung mit 29% WPG reichte im Letzteren aus, um einen Masseverlust von unter 1% bei *P. sylvestris* zu erreichen, allerdings lag die Prüffrist bei nur 6 Wochen. Der Bodentest führte zur Einstufung in DHK 1 (sehr dauerhaft) (HOYDONCKX et al. 2007).

In einer vergleichenden Studie über die Dauerhaftigkeit von furfuryliertem, acetyliertem und thermisch modifiziertem Holz mit unterschiedlichem Modifizierungsgrad (WPG bzw. Temperatur) zeigte furfuryliertes Kiefernspiltholz in verschiedenen Labor- und Feldversuchen eine hohe Dauerhaftigkeit (DHK 1-2) mit überraschend ähnlichen Ergebnissen trotz unterschiedlichen FA-Modifizierungsgraden (ALFREDSEN und WESTIN 2009).

3.4.5 Modifiziertes Buchen- und Kiefernholz mittels DMDHEU

Mit DMDHEU getränktes Buchen- und Kiefernspiltholz (Belmadur-Verfahren) verbessert seine Resistenz gegen *Coniophora puteana* und *Coriolus versicolor* mit zunehmender Massenzunahme (WPG, weight percent gain). Ausreichender Schutz ($MV < 3\%$) wurde im Mini-blocktest ($30 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$) nach 12-wöchiger Prüfzeit mit einem WPG von ca. 15% bei Buche und 10% bei Kiefer erreicht (inkl. Auswaschung nach EN 84) (MAI et al. 2009, VERMA et al. 2009). Eine Klassifizierung in Dauerhaftigkeitsklassen wurde in dieser Studie nicht veröffentlicht. BOLLMUS et al. (2009) erreichten mit DMDHEU-getränkter Buche eine Verschiebung der DHK in Abhängigkeit von der Konzentrationslösung von ursprünglich Klasse V auf Klasse I bis II gemäß Untersuchungen nach CEN/TS 15083-1. WTT-Thermobuche 180°C ergab eine Verbesserung der Resistenz in Klasse II.

3.5 Erkenntnisse von Dritten

Neuere Untersuchungen zu den Eigenschaften bzw. der Verwendung thermisch modifizierter Hölzer befassen sich unter anderem mit Sperrholz aus thermisch modifizierten Furnieren (BLÜTHGEN und SCHULZ, 2008), Fenstern aus Thermoholz (SCHWEITZER, 2008), der Dauerhaftigkeit nach Freilandversuchen (PLASCHKIES und WEIß, 2008) sowie mit der qualitativen und quantitativen Erfassung von durch Thermoholzprodukte emittierten Geruchsstoffen (PFRIEM et al., 2008). Weiterhin wurden Untersuchungen zur Oberflächenhärte von thermisch modifiziertem Eschenholz durchgeführt (LEITCH, 2009).

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten des WTT-Behandlungsverfahrens mit der untersuchten Anlage werden mittelfristig als gut bis sehr gut eingeschätzt.

Durch die gewonnenen Ergebnisse und die Optimierung der Prozesse wird der Innovationsprozess in der Holzindustrie gefördert und auf dieser Grundlage mögliche weitere Anwendungsbereiche für Holzprodukte aus heimischen Holzarten erschlossen, insbesondere auch für Holzarten die momentan weniger genutzt werden.

Mit der durch die Thermobehandlung erzielbaren Verringerung des Quell- und Schwindverhaltens bei einer zugleich möglichen Erhöhung der Dauerhaftigkeit werden zwei, besonders für die Verwendung von Holz im Außenbereich, bedeutende Nachteile des natürlichen Holzes entscheidend verbessert. Aus diesem Grund werden Thermoholzprodukten erhebliche Wachstumschancen zugesprochen.

Bisher konzentrieren sich Thermoholzprodukte sowie Untersuchungen zu deren Eigenschaften vor allem auf Nadelholz. Die Hauptvorteile des Verfahrens, aber auch die ungenutzten Holzressourcen in Deutschland und Mitteleuropa, werden aber vor allem im Bereich des Laubholzes, hier insbesondere der Buche gesehen. Die technische Optimierung des Verfahrens und der Technologie führten zu weiteren, deutlichen Verbesserungen der Produktqualität.

Insbesondere mittelständische Betriebe der Holzwirtschaft sollen durch Aufzeigen der Eigenschaften von Thermoholz und die Möglichkeit einer technisch beherrschbaren und finanziell erschwinglichen Methode für die Thermoholzproduktion in Deutschland gewonnen werden. Dadurch können die Wettbewerbsfähigkeit auf bestehenden Märkten erhöht und zusätzlich neue Märkte mit Produkten erschlossen werden, die über verbesserte Eigenschaften verfügen.

4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften sowie durch Vorträge auf Tagungen, Konferenzen und Messen für das Fachpublikum und anderen interessierten Personen zugänglich gemacht, um Anstöße zu nachfolgende Untersuchungen auf diesem Gebiet zu geben.

Es erfolgt ein Wissens- und Erkenntnisaustausch mit dem Institut für Forstbotanik der Universität Freiburg und den Projektpartnern aus der Wirtschaft. Es wird weiterhin ein Wissenstransfer mit anderen Forschungseinrichtungen und Herstellern thermisch modifizierten Holzes bzw. Herstellern von Anlagen für die thermische Modifizierung angestrebt – unter anderem durch Teilnahme an themenspezifischen Konferenzen.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Mittelfristig können die Ergebnisse dieser Untersuchungen die Grundlage für Anschlussuntersuchungen des (nach diesem Verfahren) thermisch behandelten Holzes in Langzeitversuchen

bilden. Im Anschluss an die laufenden Versuche sollen Wasseranalysen erfolgen über Art und Quantität der ausgewaschenen Stoffe aus der Auswaschung von thermisch modifizierten Hölzern nach EN 84 stammen.

Die Untersuchung mikroskopischer Schnitte der für die Dauerhaftigkeitsversuche verwendeten Hölzer soll Erkenntnisse über die Veränderung der Zellstruktur durch die thermische Behandlung sowie über das Verhalten der Pilze in dieser Zellstruktur erbringen. Eine diesbezügliche Promotionsarbeit wurde an der Professur für Forstbotanik der Universität Freiburg begonnen.

Eine Untersuchung von thermisch modifizierten Hölzern hinsichtlich ihrer Resistenz/Dauerhaftigkeit gegenüber Pilzen, welche sich speziell an verbranntes Holz angepasst haben, erscheint erforderlich, da die derzeitigen Prüfpilze nicht auf durch Hitze einwirkung verändertes Holz spezialisiert sind.

Die seit 2005 Oktober existierende Vornorm 15083-1 und -2 „Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen Holz zerstörende Pilze. Prüfverfahren – Teil 1: Basidiomyceten bzw. Teil 2: Moderfäulepilze“ ist im Oktober 2007 abgelaufen und ist bisher noch nicht in eine Europäische Norm überführt worden. Einige der Formulierungen und Vorgaben dieser Vornormen haben sich als überarbeitungsbedürftig erwiesen, um zweifelsfreie und vergleichbare Prüfungen durchführen zu können.

Auch die seit Ende 2007 existierende Technische Spezifikation CEN/TS 15679:2007 „thermisch modifiziertes Holz – Definitionen und Eigenschaften“ erscheint vor dem Hintergrund der Vielzahl von unterschiedlichen Behandlungsverfahren überarbeitungsbedürftig – insbesondere hinsichtlich der definierten Behandlungsverfahren und Eigenschaften, und wie diese zu bestimmen sind.

4.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die aus diesem Vorhaben erfolgten und noch geplanten Veröffentlichungen.

Datum	Art	Zielgruppe	Beteiligte Partner	Referenz / Veranstaltung
02/2008	Workshop	Praxis	FobAwi / FoBot	Ohnesorge, D.; Tausch, A.; Krowas, I. (2008): Thermisch modifiziertes Holz – eine umweltfreundliche Alternative der Holzvergütung? Thermoholz-Workshop. Veranstalter: Regionalverband Neckar-Alb e.V. und Handwerkskammer Reutlingen.
02/2008	Präsentation	Praxis	FobAwi / FoBot	Tausch, A.; Ohnesorge, D.; Krowas, I. (2009): Industrieprojekt - Thermoholz nach dem WTT-Verfahren. Holztechnologische und holzbiologische Versuche. Sitzung VDP am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft.
06/2008	Artikel	Praxis	FobAwi	Ohnesorge, D., Krowas I. (2008): Thermisch modifiziertes Holz – Erschließung neuer Einsatzbereiche für heimisches Holz. GFH – Informationen aus Forschung und Lehre, 2008: 7-8.
06/2008	Artikel	Praxis	FobAwi	Ohnesorge, D., Becker, G. (2008): Thermisch modifiziertes Holz – eine umweltfreundliche Alternative? KernHolz – Das Magazin für Architekten und Planer 2008:4 (1): 4-8.
09/2008	Präsentation	Praxis	FobAwi / FoBot	Ohnesorge, D., Becker, G. (2008): Hygrothermally treated timber 2008 (Western European Institute for Wood Preservation (WEI-IEO); WIE Conference 15. Sept 2008)
09/2008	Präsentation	Wissenschaft	FobAwi / FoBot	Krowas, I.: Hydro-thermally treated timber. Beitrag für das 12tes Treffen mit INRA/LERFoB, Nany. 15.-16.9.2008, Freiburg.
11/2008	Poster	Wissenschaft	FobAwi	Ohnesorge, D., Krowas I., Becker, G.: Results of Durability Tests of Hydrothermally Treated Lumber. 2008 (SWST International Annual Convention 10. – 13. November 2009 in Concepcion, Chile), Society of Wood Science and Technology (SWST) und Universidad del Bio-Bio (Hrsg).
01/2009	Vorlesung / Lehre	Studenten Forstwiss.	FobAwi	Krowas, I. (2009): Holzschutz – Thermisch modifiziertes Holz.
02/2009	Artikel	Wissenschaft / Praxis	FobAwi	Krowas, I., Ohnesorge, D., Becker, G. (2009): Thermisch modifiziertes Holz nach dem WTT-Thermo Verfahren AFZ-DerWald. 2009:64 (2):68-69.
04/2009	Poster	Wissenschaft	alle	Ohnesorge, D.; Krowas, I.; Tausch, A. (2009): Thermoholz nach dem WTT-Verfahren – Ergebnisse von Erdkontaktversuchen nach ENV807 bzw. CEN/TS 15081-2.
04/2009	Poster	Wissenschaft	alle	Tausch, A.; Ohnesorge, D.; Krowas, I. (2009): Thermoholz nach dem WTT-Verfahren – Ergebnisse von Agarblocktests nach EN 113 bzw. CEN/TS 15081-1.
04/2009	Artikel	Wissenschaft	alle	Ohnesorge, D., Tausch, A., Krowas, I., Huber, C., Becker, G., Fink, S. (2009): Laboratory Tests on the Natural Durability of Six Different Wood Species after Hygrothermal Treatment. Proceedings of the 4th European Conference on Wood Modification (ECWM4), 2009: 159-164 (4th European Conference on Wood Modification, 27-29 April 2009 in Stockholm, Sweden), SP Technical Research Institute of Sweden (Hrsg):

Datum	Art	Ziel gruppe	Beteiligte Partner	Referenz / Veranstaltung
05/2009	Kurzbericht	Wissen- schaft / Praxis	FobAwi / FoBot	Ohnesorge, D.; Tausch, A.; Krowas, I; Becker, G.; Fink, S. (2009): Hygro-thermisch modifiziertes Holz nach dem WTT- Verfahren. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswis- senschaft Professur für Forstbotanik der Universität Freiburg. 2009:8 S.
05/2009	Messeprä- sentation	Praxis	alle	Messestand der Projektpartner WTT und WH anlässlich der LIGNA 2009 - Weltmesse der Forst und Holzwirtschaft in Han- nover.
08/2010	Präsentation	Wissen- schaft	FobAwi / FoBot	IUFRO- World-Kongress, Seoul 23.-29.8.2010

5 Verzeichnisse

5.1 Abkürzungen

RH	Relative Luftfeuchtigkeit (r elative h umidity)
TH	Behandlungstemperatur
MV	Masseverlust
FWD	Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren
PK	Prüfkörper
MOE	Modulus of elasticity

5.2 Normen und Merkblätter

- CEN/TS 15083-1:2005-07: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen Holz zerstörende Pilze, Prüfverfahren – Teil 1: Basidiomyceten.
- CEN/TS 15083-2:2005-11: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen Holz zerstörende Pilze, Prüfverfahren – Teil 2: Moderfäulepilze.
- DIN 52182:1976-09: Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte.
- DIN 52183:1977-11: Prüfung von Holz – Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes.
- DIN 52184:1979-05: Prüfung von Holz – Bestimmung der Quellung und Schwindung.
- DIN 52186:1978-06: Prüfung von Holz – Biegeversuch.
- EN 113:1996-11: Holzschutzmittel – Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen Holz zerstörende Basidiomyceten – Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit
- EN 335-1:2006-10: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Definition der Gebrauchsklassen – Teil 1: Allgemeines.
- EN 335-2:2006-10: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Definition der Gebrauchsklassen – Teil 2: Anwendung bei Vollholz.
- EN 350-1:1994-10: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 1: Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz.
- EN 350-2:1994-10: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa.
- EN 460:1994-10: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Leitfaden für die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Holz für die Anwendung in den Gefährdungsklassen.
- EN 84:1997-05: Holzschutzmittel – Beschleunigte Alterung von behandeltem Holz vor biologischen Prüfungen – Auswaschbeanspruchung.
- EN ISO 3696:1991-06: Wasser für analytische Zwecke – Anforderungen und Prüfungen.
- ENV 807:2001-05: Holzschutzmittel – Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen.
- EN ISO 12571:2000-04: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.

5.3 Literaturverzeichnis

- Ala-Viikari, J., Mayes, D. (2009): New generation ThermoWood – How to take ThermoWood to the next level. . In Proceedings of the 4th European Conference of Wood Modifikation, Stockholm, Schweden. S. 23-29.
- Alexander, J. (2007): AccoyaTM An opportunity for improving perceptions of timber joinery. In Proceedings of the 3rd European Conference of Wood Modifikation, Cardiff, Wales. S. 431-438.
- Alfredsen, G., Westin, M.; Scheiding, W. (2005): Thermoholz in der Anwendung – Eigenschaften und Möglichkeiten. Holztechnologie 46 (2):22-29
- Ayadi, N.; Lejeune, F.; Charrier, F.; Charrier, B.; Merlin, A. (2003): Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. Holz Roh Werkst 61 (3):221-226.
- Bellmann, H. (1988a): Zur Frage der Bewertung von Labor-Versuchsergebnissen über die Basidiomyceten-Resistenz der Holzarten: Bisherige Ergebnisse, Vergleichbarkeit – Literaturüberblick. Holz Roh- Werkstoff 46: 259-267.
- Bellmann, H. (1988b): Zur Frage der Bewertung von Labor-Versuchsergebnissen über die Basidiomyceten-Resistenz der Holzarten: Der relative Gewichtsverlust. Holz Roh- Werkstoff 46: 259-267.
- Berard, P.; Laurent, T.; Dumonceaud, O. (2005): Use of round wood of chestnut tree coppices: crack risk and effects of a hot oil bath treatment.
- Blüthgen, L., Schulz, T. (2008): Sperrholz und Sperrholzformteile aus thermisch modifizierten Furnieren, In: 5. Europäischer TMT-Workshop 2008, Workshop Proceedings, 8 S.
- Bollmus, S., Dieste, A., Militz, H., Rademacher, P. (2009): Materialeigenschaften von modifiziertem Buchenholz. Forst und Holz 64: 30-39.
- Boonstra, M., Doelman, P. (1999): Die Eigenschaften von PLATO veredeltem Holz. PLATO HOUT BV – PLATO veredeltes Holz. 16 Seiten.
- Boonstra, M., Rigolet, S. (2006): Correlation of ¹³C-NMR analysis with fungal decay tests of polymeric structural wood constituents. I. Basidiomycetes. J Appl Polym Sci 101:2639-2649.
- Boonstra, M., Tjeerdsma, B. (2006): Chemical analysis of heat treated softwoods. Holz-Roh-Werkst 64:204-211.
- Borrega, M., Nevalainen, S., Heräjärvi (2009): Resistance of European and hybrid aspen wood against two brown-rot fungi. Eur. J. Wood Prod. 67:177-182.
- Brelid, P:L., Westin, M. (2007): Acetylated wood – results from long-term field tests. In Proceedings of the 3rd European Conference of Wood Modifikation, Cardiff, Wales. S. 71-78.
- Brischke, C., Welzbacher, C.R., Huckfeldt, T. (2008): Influence of fungal decay by different basidiomycetes on the structural integrity of Norway spruce wood. Holz Roh- Werkstoff 66: 433-438.
- Brischke, C.; Rapp, A.O. (2004): Investigation of the suitability of silver fir (*Abies alba* Mill.) for thermal modification. Stockholm: Intern. Res. Group on Wood Preserv. (IRG) 2004, 15 S. = Doc. No. IRG/WP 04-40275
- Burmester, A. (1973): Einfluß einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz Roh. Werkst. 31 (6):237-243.
- Burmester, A. 1974: Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln (2). Holz Kunststoffverarbeitung (9):610-613.
- Burmester, A; Wille, W E (1976): Quellungsverminderung von Holz in Teilbereichen der relativen Luftfeuchtigkeit. Holz Roh Werkst 34 (2):87-90.
- De Troya, D.T., Navarette, A.M. (1994): Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques. Bali: Intern. Res. Group on Wood Protection (IRG), Doc. No. 94-40030.
- Dirol D., Guyonnet R. (1993): The improvement of wood durability by retification process. Stockholm: Intern. Res. Group on Wood Preserv. (IRG), Doc. No. IRG/WP 93-40015.
- Ewert, M. (2009): Durability of modified wood – laboratory vs field performance. In Proceedings of the 4th European Conference of Wood Modifikation, Stockholm, Schweden. S. 515-522.

- Ewert, M., Scheiding, W. (2005): Thermoholz in der Anwendung – Eigenschaften und Möglichkeiten. Holztechnologie 46 (2005) 2 S. 22 – 29.
- Finnish Thermo Wood Association (2004): Thermowood Handbuch. Finnischer Verband für wärmebehandeltes Holz.
- Garrote, G.; Dominguez, H.; Parajó, J.C. (1999): Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. Holz Roh Werkst 57 (3):191-202.
- Giebeler, E. (1983): Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte-Wärme-Druck-Behandlung. Holz Roh Werkst 41 (3):87-94.
- Großmann, C. (2002): Marktchancen für hitzebehandeltes Holz in Deutschland: Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeit und Marketing. Universität Freiburg, Institut für Forstpolitik, Arbeitsbereich Markt und Marketing. 100 S.
- Hill, C., Curling, S., Kwon, J., Marty, V. (2009): Decay resistance of acetylated and hexanoated hardwood and softwood species exposed to *Coniophora puteana*. Holzforschung 63: 619-625.
- Hill, C., Hale, M., Ormondroyd, G., Kwon, J., Forster, S. (2006): Decay resistance of anhydride-modified Corsican pine sapwood exposed to the brown rot fungus *Coniophora puteana*. Holzforschung 60: 625-629.
- Hill, C., Kwon, J., Hale, M., Ormondroyd, G., Suttie, E., Howard, N. (2007): The decay resistance of anhydride modified wood. In Proceedings of 3rd European Conference on Wood Modification, Cardiff, Wales. S. 33-40.
- Hoydonckx, H., Van Rhijn, W. M., Van Rhijn, W., Hueting, D., Tjeerdsma, B., van der Zee, M., Van Acker, J. (2007): Renewable furfuryl resin technology for wood modification. In Proceedings of 3rd European Conference on Wood Modification, Cardiff, Wales. S. 81-86.
- Huckfeldt, T., Schmidt, O., Quader, H. (2005): Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Holzfäulepilzen. Holz Roh- Werkstoff 63: 209-219.
- Ishiguri, F.; Saitoh, K.; Andoh, M.; Abe, Z.; Yokota, S.; Yoshizawa, N. (2000): Improvement of heartwood color of black-colored sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) by UV irradiation after smoke heating. Holzforschung 54 (3):294-300.
- ITWA (2009): Standard-Klassifikation für die Bearbeitung von ThermoWood®. International Thermo Wood Association (e.V.). Websiteabruf am 20.12.2009 unter: <http://www.thermowood.fi/index.php?anonymous=thermode>
- Jennings, G.H. (1984): Water flow through mycelia. In The ecology and physiology of the fungal mycelium. Cambridge University Press, Cambridge, UK. S. 143-164.
- Johansson, D.; Morén, T. (2005): The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. Holz Roh Werkst 64 (2):104-110.
- Junga, U., Militz, H. (2005): Particularities in agar block tests of some modified woods caused by different protection and decay principles. In Proceedings of 2nd European Conference on Wood Modification, Göttingen, Deutschland. S. 354-362.
- Kamdern, D.P., Pizzi, A., Jermannaud, A. (2002): Durability of heat-treated wood. Holz Roh. Werkst. 60: 1-6.
- Kärki, T., Möttönen, V. (1998): Preventing discolouration of Birch (*Betula pendula*, *B. pubescens*) in HT-Drying. 1-6.
- Kollmann, F.; Schneider, A. (1963): Über das Sorptionsvermögen wärmebehandelter Hölzer, Holz Roh- Werkstoff 21 (3) 77-85.
- Lachmair, Th. (2007): Natwood – das Verfahren. <http://www.natwood.at>, letzter Abruf: 2. September 09.
- Lande, S., Westin, M., Schneider, M. (2004): Properties of furfurylated wood. Scand. J. For. Res. 19 (Suppl.5): 22-30.
- Leitch, M. (2009): Hardness values for thermally treated black ash. Wood Fiber Sci. 41 (4):440-446
- Mai, C., Verma, P., Xie, Y., Dyckmans, J., Militz, H. (2009): Mode of action of DMDHEU treatment against wood decay by white and brown rot fungi. In Proceedings of the 4th European Conference of Wood Modification, Stockholm, Schweden. S. 45-52.

- Mayes, D., Oksanen, O. (2002) ThermoWood® Handbook, version 1.0, Finnish Thermowood Association, Helsinki, Finland
(http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf).
- Mazela, B., Zakrzewski, R., Grześkowiak, W., Cofta, G., Bartkowiak, M. (2004): Resistance of thermally modified wood to basidiomycetes. EJPAU, Wood Technology 7 (1).
- Militz, H. (2002): Thermal treatment of wood: European processes and their background. International Research Group on Wood Preservation. Document No: IRG/WP 02-40241.
- Militz, H. (2004): Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art.
- Militz, H., Tjeerdsma, B. (2001): Heat Treatment of wood by the PLATO-process. In: Rapp (Hrsg.) Review on heat treatment of wood. Proceedings of special seminar held in Antibes, France on February 9th 2001. COST Action E22 Environmental optimisation of wood protection, S. 23-34
- Mitsui, K.; Takada, H.; Sugiyama, M.; Hasegawa, R. (2001): Changes in the properties of Light-Irradiated Wood with Heat Treatment – Part 1. Effect of Treatment Conditions on the Change in Color. *Holzforschung* 55 (6):601-605.
- Mundigler, N. (2005): Natwood Technology - A material thermal wood modification. In: Institut für Holzbiologie und Holztechnologie, Georg-August-Universität Göttingen (Hrsg.), The Second European Conference on Wood Modification, October 6th/7th, 2005, Göttingen, Deutschland.
- Nilsson, T., Daniel, G. (1992): On the use of % weight loss as a measure for expressing results of laboratory decay experiments. International Research Group on Wood Preservation. Document No: IRG/WP 2394-92.
- Oelhafen, M.; Niemz, P.; Hurst, A. (2006): Untersuchungen zur thermischen Vergütung von Esche und Rotbuche mit dem Ziel der Farbänderung. Teil 1: Vorversuche und physikalische Eigenschaften. *Holztechnologie* 47 (2):25-31.
- Ohkoshi, M., Kato, A., Suzuki, K., Hayashi, N., Ishihara, M. (1999): Characterization of acetylated wood decayed by brown-rot and white-rot fungi. *J. Wood Science* 45:69-75.
- Papadopoulos A., Hill, C. (2002): The biological effectiveness of wood modified with linear chain carboxylic acid anhydrides against *Coniophora puteana*. *Holz Roh- Werkstoff* 60: 329-332.
- Patzelt, M.; Stingel, R.; Teischinger, A. (2002): Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluß auf ausgewählte Holzeigenschaften. In: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Lignovisionen. Schriftenreihe des Institutes für Holzforschung (ihf) und Verband Holzwirte Österreichs (VHÖ). Universität für Bodenkultur Wien. Bd. 3. S. 101-147.
- Paul, W., Ohlmeyer, M., Leithoff, H. (2007): Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment – Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. *Holz Roh- Werkstoff* 65: 57-63.
- Pfriem, A. (2008): Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Erfassung von emittierten Geruchsstoffen in Thermoholzprodukten unter Berücksichtigung der Feuchtigkeitsaufnahme und des Feuchtigkeitstransports, In: 5. Europäischer TMT-Workshop 2008, Workshop Proceedings, 3 S.
- Plaschkies, K., Weiß, B. (2008): Dauerhaftigkeit von TMT: Ergebnisse der Freilandprüfung, In: 5. Europäischer TMT-Workshop 2008, Workshop Proceedings, 7 S.
- Pöhler-Rotach, E.; Seubert-Hunziker, H. (2002): Holzkunde Teil II – Holzchemie. Lehrmaterialien. Professur Holzwissenschaften. Department Forstwissenschaften. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. 42. S.
- Popper, R.; Niemz, P.; Eberle, G. (2005): Untersuchungen zum Sorptions- und Quellungsverhalten von thermisch behandeltem Holz. *Holz Roh Werkst* 63 (2):135-148.
- Rapp, A., Sailer, M. (2001): Heat-Treatment in Germany – state of the art. In: Rapp (Hrsg.) Review on heat treatment of wood. Proceedings of special seminar held in Antibes, France on February 9th 2001. COST Action E22 Environmental optimisation of wood protection, S. 43-60
- Roffael, E.; Hennecke, U, Schneider, T. (2003): Verbesserung der Lichtbeständigkeit von Buchenholz furnier durch Behandlung mit heißem Wasser. *Holz Roh Werkst* 61 (1):46-47.

- Runkel, R. O. H.; Lüthgens, M. (1956): Untersuchungen über die Heterogenität der Wassersorption der chemischen und morphologischen Komponenten verholzter Zellwände. Holz Roh- Werkstoff 14:424-439
- Rusche H (1973): Festigkeitseigenschaften von trockenem Holz nach thermischer Behandlung. Holz Roh- Werkstoff 31: 273-281
- Sailer, M., Rapp, A., Leithoff, H., Peek, R-D. (2000): Vergütung von Holz durch Anwendung einer Öl-Hitzebehandlung. Holz Roh- Werkstoff 58:15-22.
- Scheiding, W., Rapp, A., Krause, A. (2007): Thermally Modified Timber (TMT) Facing European Standards. In proceedings of the 3rd European Conference on Wood Modification, Cardiff, Wales. S. 413-421.
- Schneider A (1971) Untersuchungen über den Einfluss von Wärmebehandlung im Temperaturbereich von 100°C bis 200°C auf Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Bruchschlagarbeit von Kiefern-Splint und Buchenholz. Holz Roh- Werkstoff 29:431-440.
- Schönberger, S. (2003): Merkblatt Thermoholz-Verarbeitung. Mitteramskogler GmbH & Thermoholz Austria GmbH, Gaflenz, 3 pp.
- Schroll, S. (2009): Interaktion zwischen thermisch behandeltem Holz und Moderfäule verursachenden Pilzen auf Basis von Erdkontaktversuchen. Professur für Forstbotanik, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Diplomarbeit. 72 S.
- Schwarze, F., Spycher, M. (2005): Resistance of thermo-hygro-mechanically densified wood to colonisation and degradation by brown-rot fungi. Holzforschung 59: 358-363.
- Schweitzer, K. (2008): Markteinführung von Thermoholzfenstern. In: 5. Europäischer TMT-Workshop 2008, Workshop Proceedings, 8 S.
- Skyba, A. (2008): Durability and Physical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM) – Densified Wood. Dissertation, ETH Zürich, Schweiz.
- Sonderegger, W. Niemz, P. (2001): Untersuchung zur Bestimmung der Brinell-Härte an MDF-und HDF-Platten mittels Wegmessung. Interner Bericht der Professur für Holzwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. ETH Zentrum.
- Troya, M.T.; De Navarrete, A.M. (1994): Study of the degradation of retified wood through ultrasonic and gravimetric techniques. IRG/WP 94-40030, 6 p
- Vaca-Garcia, C. (2009): Surfasm – Innovative "green" wood treatment to achieve risk class 4 protection. Project presentation. <http://www.surfasm.com>, letzter Abruf: 2. September 09.
- Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra-Alvarez, R., Militz, H., Le Bayon, I., Kleist, G., Peek, R.D. (1998): Criteria for basidiomycete testing and ways of defining natural durability classes. International Research Group on Wood Preservation. Document No: IRG/WP 98-20144.
- Van Acker, J., Stevens, M., Carey, J., Sierra-Alvarez, R., Militz, H., Le Bayon, I., Kleist, G., Peek, R.D. (2003): Biological durability of wood in relation to end-use. Part 1: Towards a European standard for laboratory testing of the biological durability of wood. Holz Roh- Werkstoff 61:35-45.
- Verma, P., Junga, U., Militz, H., Mai, C. (2009): Protection mechanisms of DMDHEU treated wood against white and brown rot fungi. Holzforschung 63: 371-378.
- Vernois, M. (2001): Heat treated wood in France – State of the art. In: Rapp (Hrsg.) Review on heat treatment of wood. Proceedings of special seminar held in Antibes, France on February 9th 2001. COST Action E22 Environmental optimisation of wood protection, S. 35-42.
- Viitanen, H., Paajanen, L. (1988): The critical moisture and temperature conditions for the growth of some mould fungi and the brown rot fungus *Coniophora puteana* on wood. International Research Group on Wood Preservation. Document No: IRG/WP 1369.
- Wagenführ A., Pfriem A., Eichelberger K. (2005): Der Einfluss einer thermischen Modifikation von Holz auf im Musikinstrumentenbau relevante Eigenschaften - Teil 1: Spezielle anatomische und physikalische Eigenschaften. Holztechnologie 46 (4):36-42.
- Wälchli (1977): Der Temperatureinfluß auf die Holzerstörung durch Pilze. Holz Roh- Werkstoff 35: 45-51.

- Wälchli, O. (1999): Modifizierung des Holzes durch eine milde Pyrolyse - abgeleitet aus den allgemeinen Prinzipien der Thermolyse des Holzes. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 48 (2):17-22(1973): Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch den echten Hausschwamm (*Merulius lacrimans* (Wulf.) Fr.). Holz Roh- Werkstoff 31: 96-102.
- Wang, J.Y.; Cooper, P.A. (2005): Effect of oil type, temperature and time on moisture properties of hot oil-treated wood. Holz Roh Werkst 63 (6):417-422.
- Welzbacher, C., Rapp, A. (2002): Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes – durability. International Research Group on Wood Preservation. Document No: IRG/WP 02-40229.
- Wienhaus, (2005): Chemische Änderungen bei der Wärmebehandlung von Holz. Schweiz Z Forstwes 156 (2005) 11: 427–431
- Wienhaus, O.; Van Acker, J.; Militz, H.; Stevens, M. (1999): The significance of accelerated laboratory testing methods determining the natural durability of wood. Holzforschung 53: 449-458.
- Willeitner, H. (1984): Pilzresistenz von Buchsbaum und zwei Buchs-Austauschhölzern. Holz Roh-Werkstoff 42: 275.
- Zolda, K.-H. (2003): Prüfbericht über Mykologische Untersuchung von thermisch behandeltem Holz im Hinblick auf die Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen nach EN 350-1 – Neuausfertigung auf Basis VH 03-2003. Höhere Technische Bundes- Lehr- und Versuchsanstalt Mödling, Versuchsanstalt für Holzindustrie, Mödling, 5 pp.

5.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispielhafter Verfahrensablauf der thermischen Behandlung in einer WTT-Anlage	7
Abbildung 2:	Aufteilung der Ausgangsbohlen in Untersuchungsvarianten	9
Abbildung 3:	Ermittlung der Brinell-Härte über die Eindringtiefe der Stahlkugel in die Probe	12
Abbildung 4:	Versuchsanordnung zur Prüfung des Biege-E-Modul und der Biegefestigkeit nach DIN 52186.	13
Abbildung 5:	Skizzierung der Massenänderung infolge Trocknung und Pilzbefall.....	16
Abbildung 6:	Versuchsbeete des Erdkontaktversuchs in Anlehnung an ENV 807	17
Abbildung 7:	Lagerung der PK (je ein unbehandelter Kontroll-PK, ein 160°C-PK und ein 180°C-PK) auf Agarnährboden in Glascontainern zur Resistenzprüfung nach CEN/TS-15083-1 bzw. EN 113.....	20
Abbildung 8:	Lagerung der Glascontainer in einer Klimakammer zur Resistenzprüfung nach CEN/TS-15083-1 bzw. EN 113.....	21
Abbildung 9:	Sorptionsvermögen von behandeltem und unbehandeltem Buchenholz	24
Abbildung 10:	Reduktion des Quell- und Schwindvermögens für die untersuchten Holzarten und für alle Untersuchungsvarianten.....	25
Abbildung 11:	Mittelwerte und Standardabweichung der Brinell-Härte der untersuchten Temperaturvarianten	26
Abbildung 12:	Mittelwerte für das statische E-Modul der verschiedenen Untersuchungsvarianten...	26
Abbildung 13:	Mittelwerte für die Biegefestigkeit der verschiedenen Temperaturvarianten	27
Abbildung 14:	Mittelwerte für die Bruchschlagarbeit der verschiedenen Temperaturvarianten für die Nadelholzarten Fichte, Kiefer und Tanne.....	27
Abbildung 15:	Buchenprüfkörper nach 32-wöchigem Erdkontaktversuch und anschließender Darrtrocknung	29
Abbildung 16:	Holzfeuchtegehalt der Prüfkörper von Buchen- und Kiefernspiltholz nach Entnahme aus dem Erdesubstrat in Bezug zur Ausgangsdarrmasse	30
Abbildung 17:	Masseverluste aus Erdkontaktversuchen nach CEN/TS 15083-2 bzw. ENV 807 für die untersuchten Laubhölzer (K = Kernholz; Ü = Übergangsholz; S = Splintholz) im Anschluss an eine 32-wöchige Inkubation im Erdesubstrat.....	30
Abbildung 18:	Masseverluste aus Erdkontaktversuchen nach CEN/TS 15083-2 bzw. ENV 807	

	für die untersuchten Nadelhölzer (K = Kernholz; S = Splintholz) nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat	31
Abbildung 19:	MOE vor Erdkontaktversuchen (obere Grafik) für die untersuchten Nadelhölzer (K = Kernholz; S = Splintholz) und prozentualer MOE-Abfall nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat	32
Abbildung 20:	400-fache Vergrößerung mikroskopischer Schnitte von Buchenholz nach 32-wöchiger Inkubation im Erdesubstrat (A Probe aus dem Grenzbereich Boden-Luft; B aus dem Bodenbereich) - obere Reihe unbehandeltes, untere Reihe bei 180°C behandeltes Buchenholz (aus Schroll, 2009)	33
Abbildung 21:	Mittlere Masseverluste [%] (n. CEN/TS 15083-1) der untersuchten Laubhölzer nach 16 Wochen Versuchsdauer dargestellt für den jeweiligen Versuchspilz und Untersuchungsvariante.....	35
Abbildung 22:	Vergleich der Masseverluste (%) nach 16- bzw. 32-wöchiger Prüfdauer verursacht durch <i>Poria placenta</i> an Tanne und <i>Coriolus versicolor</i> an Buche bzw. Eiche.....	36
Abbildung 23:	Mittlere Masseverluste [%] (CEN/TS 15083-1) der untersuchten Nadelhölzer nach 16 Wochen Versuchsdauer dargestellt für den jeweiligen Versuchspilz und Untersuchungsvariante.....	37
Abbildung 24:	Holzfeuchte (%) der Laubhölzer nach 16 Wochen Inkubationszeit. Balken: Standardabweichung	40
Abbildung 25:	Holzfeuchte (%) der Nadelhölzer nach 16 Wochen Inkubationszeit. Balken: Standardabweichung	41
Abbildung 26:	Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Masseverlust für Kiefer nach 16 Wochen Bepilzung mit dem Nadelholzspezialist <i>Poria placenta</i>	42
Abbildung 27:	Holzfeuchte in Abhängigkeit vom Masseverlust für Kiefer nach 16 Wochen Bepilzung mit dem Braunen Kellerschwamm (<i>Coniophora puteana</i>).....	43
Abbildung 28:	Vergleich der mittleren Masseverluste von gemäß EN 84 ausgewaschenen Prüfkörpern und zuvor nicht ausgewaschenen Prüfkörpern nach 16 Wochen Inkubationszeit. Buche und Eiche waren <i>C. versicolor</i> , Kiefer war <i>C. puteana</i> ausgesetzt. (ges. = Kern und Splint).....	44
Abbildung 29:	Einstufung der Untersuchungsvarianten in Dauerhaftigkeitsklassen gemäß CEN/TS 15083-2; EN 350-2: langjährige Erfahrungswerte zur Dauerhaftigkeit von unbehandeltem Holz.....	45
Abbildung 31:	Fäuleanfälligkeit der getesteten Holzarten nach 16 Wochen Inkubationszeit.....	49
Abbildung 31:	Änderung der natürlichen Dauerhaftigkeitsklasse aufgrund thermischer Behandlung der getesteten Holzarten. Die Klassifizierung nach EN 350-2 gibt die Einstufung aufgrund langjähriger Praxiserfahrung wider.....	50
Abbildung 33:	Ad- und Desorptionskurven für Esche für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C).....	76
Abbildung 34:	Ad- und Desorptionskurven für Eiche für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C).....	76
Abbildung 35:	Ad- und Desorptionskurven für Fichte für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C).....	77
Abbildung 36:	Ad- und Desorptionskurven für Kiefer für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C).....	77
Abbildung 37:	Ad- und Desorptionskurven für Tanne für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C).....	78

5.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Am Vorhaben beteiligte Partner.....	2
Tabelle 2:	Detailplanung des Vorhabens und beteiligte Partner	3
Tabelle 3:	Verfahrenstechnische und wirtschaftliche Unterschiede des WTT-Verfahrens im Vergleich zu anderen Verfahren der thermischen Behandlung von Holz.....	8

Tabelle 4:	Durchgeführte Versuche zu den Quell- und Schwindeigenschaften sowie zum Sorptionsvermögen – minimal verwendeten Prüfkörperanzahl je Baumart, Stamm, Stammzone und Untersuchungsvariante	10
Tabelle 5:	Klimastufen (Temperatur und relative Luftfeuchte) der durchgeführten Untersuchungen.....	11
Tabelle 6:	Übersicht zu den durchgeführten Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften mit den Abmaßen und der Prüfkörperanzahl (Prüfpunkte) je Baumart und Untersuchungsvariante	11
Tabelle 7:	Gebrauchsklassen nach DIN 335-1	14
Tabelle 8:	Verwendete Normen und Prüfkörpermaße.....	14
Tabelle 9:	Differenzierung der untersuchten Prüfkörperarten (PK-Arten).....	15
Tabelle 10:	Messdatenermittlungen in Abhängigkeit vom Ablaufschritt des Prüfverfahrens.....	16
Tabelle 11:	Skale zur vorläufigen Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit nach Erdkontaktversuchen nach CEN/TS 15083-2.....	19
Tabelle 12:	Verwendete Prüfpilze in den Agarblocktests nach CEN/TS 15083-1 und EN 113.....	20
Tabelle 13:	Mindestmasseverluste der Bezugsholz-PK in Abhängigkeit vom Prüfpilz nach 16 Wochen Versuchsdauer	21
Tabelle 14:	Skalen zur vorläufigen Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit nach Agarblocktests nach CEN/TS 15083-1 bzw. nach EN 113	22
Tabelle 15:	Darrdichte, Dichte im Normalklima und Substanzabbau (SA) nach thermischer Behandlung.....	23
Tabelle 16:	Klassen der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz gegen Pilzbefall aufgrund von Laborversuchen auf der Basis von EN 113 bzw. EN 350-1 und CEN/TS 15083-1	45
Tabelle 17:	Vergleich der Einstufung der Untersuchungsvarianten in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen anhand des höchsten Median Masseverlustes (MV) nach CEN/TS 15083-1 bzw. des höchsten mittleren Masseverlustes nach EN 113	46
Tabelle 18:	Anzahl der untersuchten Prüfkörper im Versuch nach ENV 807 für alle Holzarten, Untersuchungsvarianten, Versuchsdauern und Holzbereiche.....	67
Tabelle 19:	Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante für Laubhölzer	68
Tabelle 20:	Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante für Nadelhölzer	68
Tabelle 21:	Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Kontroll- und Virulenzprüfkörper ...	69
Tabelle 22:	Anzahl der unausgewaschenen Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante	69
Tabelle 23:	Ergebnisse zur Untersuchung der Brinell-Härte.....	70
Tabelle 24:	Ergebnisse zur Untersuchung des Biege-E-Moduls	70
Tabelle 25:	Ergebnisse zur Untersuchung der Biegefestigkeit.....	70
Tabelle 26:	Ergebnisse zur Untersuchung der Bruchschlagarbeit.....	71
Tabelle 27:	Feuchtigkeitsgehalt der Proben im Trockenklima, Normalklima und Feuchtklima....	71
Tabelle 28:	Die differentielle Quellung in radialer Richtung für die untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten in %/%	72
Tabelle 29:	Quellungskoeffizienten in radialer Richtung für die untersuchten Baumarten und alle Untersuchungsvarianten	73
Tabelle 30:	Quellungskoeffizienten in tangentialer Richtung für die untersuchten Baumarten und alle Untersuchungsvarianten	73
Tabelle 31:	Maximales lineares Quellmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten.....	74
Tabelle 32:	Maximales lineares Quellmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten.....	74
Tabelle 33:	Trocknungs-Schwindmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten.....	75
Tabelle 34:	Trocknungs-Schwindmaß in tangentialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten.....	75

6 Anhang

6.1 Prüfkörperumfang

Tabelle 18: Anzahl der untersuchten Prüfkörper im Versuch nach ENV 807 für alle Holzarten, Untersuchungsvarianten, Versuchsdauern und Holzbereiche

Baumart	Versuchsdauer	unbehandelt			160°C			180°C		
		Kern	Splint	Übergang	Kern	Splint	Übergang	Kern	Splint	Übergang
Buche	8	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	16	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	24	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	32	9	9	-	9	9	-	9	9	-
Esche	8	4	4	4	4	4	4	5	3	4
	16	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	24	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	32	6	6	6	6	6	6	5	7	6
Eiche	8	6	6	-	6	6	-	2	2	-
	16	6	6	-	6	6	-	2	2	-
	24	6	6	-	6	6	-	2	2	-
	32	9	9	-	9	9	-	3	3	-
Fichte	8	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	16	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	24	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	32	8	9	-	9	9	-	9	9	-
Kiefer	8	6	6	-	6	6	-	4	6	-
	16	6	6	-	6	6	-	4	6	-
	24	6	6	-	6	6	-	4	6	-
	32	6	7	-	8	8	-	6	9	-
Tanne	8	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	16	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	24	6	6	-	6	6	-	6	6	-
	32	9	9	-	8	9	-	7	9	-

Tabelle 19: Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante für Laubhölzer

Baumart	Variante	Zone	Pilzart				Gesamt
			C. puteana	G. trabeum	C. versicolor	S. lacrymans	
Buche	unbehandelt	Kern	19	15	15	15	64
		Übergang	10				10
		Splint	30	15	18	15	78
	160°C	Kern	19	15	15	15	64
		Übergang	12				12
		Splint	27	15	18	15	75
	180°C	Kern	19	15	15	15	64
		Übergang	28				28
		Splint	10	15	18	15	58
	unbehandelt	Kern	14	10	10	10	44
		Übergang		10	10	10	30
		Splint	15	10	10	10	45
Esche	160°C	Kern	14	10	10	10	44
		Übergang		10	10	10	30
		Splint	15	10	10	10	45
	180°C	Kern	9	10	10	10	39
		Übergang	5	10	10	10	35
		Splint	6	10	10	10	36
Eiche	unbehandelt	Kern	30	14	15	13	72
		Splint	30	15	10	20	75
	160°C	Kern	30	14	14	13	71
		Splint	30	15	10	20	75
	180°C	Kern	16	4	4	4	28
		Übergang		4	5	3	12
		Splint	25	5	5	5	40
	Gesamt		413	251	252	258	1174

Tabelle 20: Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante für Nadelhölzer

Variante für Pilzarten			Pilzart				Gesamt
Baumart	Variante	Zone	C. puteana	G. trabeum	C. versicolor	S. lacrymans	
Fichte	unbehandelt	Kern	29	15	13	15	72
		Splint	30	15	19	15	79
	160°C	Kern	24	15	13	15	67
		Splint	27	15	19	15	76
	180°C	Kern	27	15	10	15	67
		Splint	30	15	19	15	79
Kiefer	unbehandelt	Kern	15	15	15	15	60
		Splint	15	15	10	10	50
	160°C	Kern	17	15	15	15	62
		Splint	15	20	10	10	55
	180°C	Kern	18	10	10	10	48
		Splint	15	15	15	15	60
Tanne	unbehandelt	Kern	9	11	8	8	36
		Splint	12	14	17	15	58
	160°C	Kern	15	11	8	8	42
		Splint	11	14	14	15	54
	180°C	Kern	14	11	8	8	41
		Splint	15	13	12	15	55
Gesamt			338	254	235	234	1061

Tabelle 21: Anzahl der in den Agarblocktests untersuchten Kontroll- und Virulenzprüfkörper

Baumart	Prüfkörperart	Pilz	unbehandelt	160°C	180°C	Gesamt
Buche	Kontrolle		4	6	5	15
	Virulenz	C. puteana	4			4
		G. trabeum	6			6
		C. versicolor	9			9
		S. lacrymans	9			9
Esche	Kontrolle		6	6	6	18
	Virulenz	C. puteana	3			3
		G. trabeum	6			6
		C. versicolor	3			3
		S. lacrymans	6			6
Eiche	Kontrolle		7	7	4	18
	Virulenz	C. puteana	9			9
		G. trabeum	9			9
		C. versicolor	6			6
		S. lacrymans	9			9
Fichte	Kontrolle		6	6	6	18
	Virulenz	C. puteana	9			9
		G. trabeum	9			9
		C. versicolor	9			9
		S. lacrymans	9			9
Kiefer	Kontrolle		6	6	5	17
	Virulenz	C. puteana	9			9
		G. trabeum	9			9
		C. versicolor	6			6
		S. lacrymans	9			9
Tanne	Kontrolle		6	6	6	18
	Virulenz	C. puteana	6			6
		G. trabeum	3			3
		C. versicolor	3			3
		S. lacrymans	3			3
Gesamt			198	37	32	267

Tabelle 22: Anzahl der unausgewaschenen Prüfkörper je Baumart und Untersuchungsvariante

Baumart	Variante	Zone	Pilz	Anzahl
Buche	unbehandelt	Übergang	C. versicolor	22
	160°C	Übergang	C. versicolor	10
		Splint	C. versicolor	7
	180°C	Übergang	C. versicolor	10
		Splint	C. versicolor	17
Eiche	unbehandelt	Übergang	C. versicolor	11
		Splint	C. versicolor	17
	160°C	Kern	C. versicolor	7
		Übergang	C. versicolor	14
		Splint	C. versicolor	35
Kiefer	unbehandelt	Kern	C. puteana	10
		Splint	C. puteana	10
	160°C	Kern	C. puteana	6
		Splint	C. puteana	5
	180°C	Kern	C. puteana	7
		Splint	C. puteana	8
Gesamt				196

6.2 Detailergebnisse der holztechnologischen Untersuchungen

Tabelle 23: Ergebnisse zur Untersuchung der Brinell-Härte

Baumart	Behandlung	Mittelwert [N/mm ²]	Standard- abweichung [N/mm ²]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]	Anzahl Prüfpunkte	Kennwert
Buche	unbeh.	76	5	67	85	31	-37
	160°C	70	12	55	99	37	-22
	180°C	77	10	59	104	29	-24
Esche	unbeh.	78	9	54	100	32	-14
	160°C	74	8	60	92	28	-27
	180°C	82	9	62	97	38	-22
Eiche	unbeh.	56	6	45	70	35	46
	160°C	42	8	29	60	35	29
	180°C	–	–	–	–	–	–

Tabelle 24: Ergebnisse zur Untersuchung des Biege-E-Moduls

Baumart	Behandlung	Mittelwert [N/mm ²]	Standard- abweichung [N/mm ²]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]	Anzahl Prüfkörper
Buche	unbeh.	13.054	935	11.450	14.566	12
	160°C	13.540	1.276	11.411	15.872	12
	180°C	13.892	972	12.270	15.292	12
Esche	unbeh.	13.908	2.350	11.573	17.521	8
	160°C	13.547	1.735	11.398	16.117	8
	180°C	13.291	2.079	11.032	15.554	7
Eiche	unbeh.	10.562	815	8.886	12.658	20
	160°C	10.358	1.494	8.372	13.415	20
	180°C	–	–	–	–	–
Fichte	unbeh.	10.314	1.617	7.439	12.820	12
	160°C	9.854	1.262	8.096	11.472	12
	180°C	10.598	2.204	7.252	13.563	12
Kiefer	unbeh.	12.257	1.822	9.124	14.516	11
	160°C	11.875	2.025	6.868	14.731	12
	180°C	12.435	962	10.325	13.446	8
Tanne	unbeh.	8.611	881	7.468	9.796	8
	160°C	9.452	1.005	8.073	10.780	11
	180°C	9.528	1.275	7.201	12.263	12

Tabelle 25: Ergebnisse zur Untersuchung der Biegefestigkeit

Baumart	Behandlung	Mittelwert [N/mm ²]	Standard- abweichung [N/mm ²]	Minimum [N/mm ²]	Maximum [N/mm ²]	Anzahl Prüfkörper
Buche	unbeh.	122	7	114	135	12
	160°C	81	17	50	102	12
	180°C	87	26	40	125	12
Esche	unbeh.	128	21	107	165	8
	160°C	88	10	73	100	8
	180°C	77	12	65	99	7
Eiche	unbeh.	102	9	81	114	20
	160°C	94	15	72	127	20
	180°C	–	–	–	–	–
Fichte	unbeh.	80	9	62	96	12
	160°C	50	16	25	74	12
	180°C	61	28	23	96	12
Kiefer	unbeh.	100	14	80	118	11
	160°C	72	19	47	100	12
	180°C	74	21	50	97	8
Tanne	unbeh.	79	5	71	89	8
	160°C	62	12	43	80	11
	180°C	53	19	22	83	12

Tabelle 26: Ergebnisse zur Untersuchung der Bruchschlagarbeit

Baumart	Behandlung	Mittelwert [KJ/m²]	Standard- abweichung [KJ/m²]	Minimum [KJ/m²]	Maximum [KJ/m²]	Anzahl Prüfkörper
Buche	unbehandelt	113	35	65	200	12
	160°C	69	26	18	105	12
	180°C	51	24	10	75	12
Esche	unbehandelt	92	31	53	153	8
	160°C	70	27	27	108	8
	180°C	38	14	15	54	8
Eiche	unbehandelt	93	14	70	128	39
	160°C	69	22	41	126	29
	180°C	–	–	–	–	–
Kiefer	unbehandelt	54	17	33	93	12
	160°C	40	24	14	80	12
	180°C	43	18	16	68	9
Tanne	unbehandelt	38	5	30	46	11
	160°C	30	10	13	45	12
	180°C	28	10	8	41	12
Fichte	unbehandelt	42	12	27	63	12
	160°C	28	10	15	48	12
	180°C	40	19	7	60	12

Tabelle 27: Feuchtigkeitsgehalt der Proben im Trockenklima, Normalklima und Feuchtklima

Holzart	Behandlung	u _T [%] (20°C/35%rL f)	u _N [%] (20°C/65%rL f)	u _F [%] (20°C/90%rL f)
Buche	unbehandelt	6,9	12,1	23,8
	160°C	4,5	7,7	12,8
	180°C	3,8	5,7	8,8
Esche	unbehandelt	6,2	10,9	22,3
	160°C	4,2	8,5	13,4
	180°C	3,5	5,8	9,3
Eiche	unbehandelt	9,3	12,7	19,3
	160°C	6,2	11,8	14,9
	180°C	6,2	9,3	12,5
Fichte	unbehandelt	6,8	12,6	24,2
	160°C	4,6	9,1	17,5
	180°C	4,0	6,8	14,1
Kiefer	unbehandelt	6,8	11,8	21,6
	160°C	4,7	8,7	15,7
	180°C	4,1	6,5	10,6
Tanne	unbehandelt	6,5	11,1	22,8
	160°C	4,8	7,5	13,9
	180°C	3,9	5,3	9,7

Tabelle 28: Die differentielle Quellung in radialer Richtung für die untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten in %/°

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%/°]	STABW [%/°]	Min [%/°]	Max [%/°]
Buche	unbehandelt	0,64	0,13	0,45	0,95
	160°C	0,15	0,08	0,06	0,39
	180°C	0,05	0,01	0,03	0,08
Esche	unbehandelt	0,48	0,11	0,29	0,67
	160°C	0,15	0,05	0,08	0,23
	180°C	0,07	0,03	0,03	0,16
Eiche	unbehandelt	0,18	0,03	0,13	0,23
	160°C	0,15	0,04	0,10	0,23
	180°C	0,08	0,04	0,02	0,16
Fichte	unbehandelt	0,43	0,13	0,24	0,66
	160°C	0,23	0,06	0,15	0,35
	180°C	0,16	0,12	0,07	0,56
Kiefer	unbehandelt	0,43	0,19	0,20	0,98
	160°C	0,20	0,11	0,04	0,55
	180°C	0,09	0,06	0,02	0,28
Tanne	unbehandelt	0,34	0,08	0,26	0,62
	160°C	0,12	0,04	0,05	0,23
	180°C	0,05	0,03	0,01	0,12

Tabelle 29: Die differentielle Quellung in tangentialer Richtung für die untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten in %/°

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%/°]	STABW [%/°]	Min [%/°]	Max [%/°]
Buche	unbehandelt	1,32	0,29	0,87	1,76
	160°C	0,33	0,14	0,12	0,63
	180°C	0,11	0,04	0,06	0,23
Esche	unbehandelt	1,02	0,25	0,65	1,50
	160°C	0,30	0,09	0,18	0,49
	180°C	0,12	0,06	0,06	0,22
Eiche	unbehandelt	0,37	0,05	0,28	0,45
	160°C	0,25	0,06	0,15	0,36
	180°C	0,13	0,06	0,05	0,24
Fichte	unbehandelt	0,99	0,27	0,67	1,55
	160°C	0,51	0,12	0,33	0,74
	180°C	0,35	0,27	0,14	1,26
Kiefer	unbehandelt	0,80	0,27	0,47	1,29
	160°C	0,39	0,20	0,10	0,86
	180°C	0,15	0,08	0,04	0,33
Tanne	unbehandelt	0,83	0,11	0,62	1,11
	160°C	0,28	0,10	0,12	0,47
	180°C	0,13	0,03	0,08	0,20

Tabelle 30: Quellungskoeffizienten in radialer Richtung für die untersuchten Baumarten und alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%/%]	STABW [%/%]	Min [%/%]	Max [%/%]
Buche	unbehandelt	0,019	0,002	0,015	0,024
	160°C	0,009	0,003	0,005	0,019
	180°C	0,005	0,001	0,004	0,007
Esche	unbehandelt	0,015	0,003	0,011	0,021
	160°C	0,008	0,002	0,004	0,011
	180°C	0,006	0,002	0,004	0,013
Eiche	unbehandelt	0,035	0,005	0,029	0,045
	160°C	0,034	0,007	0,024	0,052
	180°C	0,025	0,009	0,007	0,042
Fichte	unbehandelt	0,012	0,003	0,008	0,018
	160°C	0,009	0,002	0,006	0,013
	180°C	0,007	0,002	0,004	0,012
Kiefer	unbehandelt	0,014	0,005	0,009	0,028
	160°C	0,009	0,003	0,003	0,017
	180°C	0,007	0,003	0,003	0,015
Tanne	unbehandelt	0,011	0,002	0,008	0,019
	160°C	0,006	0,002	0,004	0,011
	180°C	0,005	0,002	0,001	0,010

Tabelle 31: Quellungskoeffizienten in tangentialer Richtung für die untersuchten Baumarten und alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%/%]	STABW [%/%]	Min [%/%]	Max [%/%]
Buche	unbehandelt	0,039	0,005	0,029	0,047
	160°C	0,019	0,005	0,011	0,028
	180°C	0,011	0,002	0,007	0,018
Esche	unbehandelt	0,032	0,005	0,025	0,041
	160°C	0,016	0,004	0,011	0,026
	180°C	0,010	0,003	0,007	0,017
Eiche	unbehandelt	0,073	0,006	0,061	0,082
	160°C	0,057	0,008	0,044	0,074
	180°C	0,040	0,011	0,020	0,059
Fichte	unbehandelt	0,028	0,006	0,020	0,041
	160°C	0,020	0,004	0,015	0,028
	180°C	0,016	0,005	0,010	0,026
Kiefer	unbehandelt	0,026	0,005	0,018	0,037
	160°C	0,017	0,005	0,009	0,026
	180°C	0,011	0,003	0,006	0,017
Tanne	unbehandelt	0,026	0,004	0,019	0,037
	160°C	0,015	0,004	0,008	0,022
	180°C	0,011	0,002	0,008	0,017

Tabelle 32: Maximales lineares Quellmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%]	STABW [%]	Min [%]	Max [%]
Buche	unbehandelt	6,1	0,8	4,9	7,7
	160°C	3,1	0,6	1,9	4,1
	180°C	2,7	0,7	1,9	4,9
Esche	unbehandelt	5,3	0,9	4,2	7,2
	160°C	3,1	0,6	2,2	4,8
	180°C	2,3	0,3	1,8	2,6
Eiche	unbehandelt	4,5	0,5	4,0	5,7
	160°C	3,1	0,3	2,5	3,7
	180°C	3,2	0,7	2,0	4,3
Fichte	unbehandelt	4,0	0,8	2,5	5,4
	160°C	2,9	0,6	1,8	4,0
	180°C	2,5	0,6	1,4	3,6
Kiefer	unbehandelt	4,8	1,0	3,8	8,1
	160°C	2,9	0,8	0,8	4,1
	180°C	2,6	0,5	1,5	3,6
Tanne	unbehandelt	3,0	0,4	2,2	3,8
	160°C	2,1	0,4	1,4	2,8
	180°C	1,7	0,4	1,2	3,1

Tabelle 33: Maximales lineares Quellmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%]	STABW [%]	Min [%]	Max [%]
Buche	unbehandelt	13,8	1,2	11,8	16,4
	160°C	8,0	0,8	6,7	9,4
	180°C	5,2	0,9	3,8	8,4
Esche	unbehandelt	11,4	1,7	7,2	14,4
	160°C	6,2	1,1	3,6	7,8
	180°C	4,2	0,6	2,7	5,4
Eiche	unbehandelt	11,0	1,0	9,0	12,3
	160°C	5,9	0,9	4,3	7,5
	180°C	5,2	1,0	3,3	6,7
Fichte	unbehandelt	9,4	1,6	7,4	13,3
	160°C	6,4	1,2	4,5	8,8
	180°C	5,2	1,0	3,1	7,4
Kiefer	unbehandelt	9,7	1,0	8,4	11,7
	160°C	5,9	1,0	2,8	8,0
	180°C	4,6	1,0	2,7	6,8
Tanne	unbehandelt	7,6	0,8	6,5	9,1
	160°C	5,4	1,0	3,2	7,2
	180°C	4,1	0,6	2,9	5,8

Tabelle 34: Trocknungs-Schwindmaß in radialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%]	STABW [%]	Min [%]	Max [%]
Buche	unbehandelt	2,5	0,4	1,8	3,3
	160°C	1,9	0,4	1,2	2,6
	180°C	1,3	0,7	0,5	3,8
Esche	unbehandelt	2,2	0,5	1,5	3,2
	160°C	1,6	0,3	1,0	2,1
	180°C	1,0	0,2	0,6	1,2
Eiche	unbehandelt	3,1	0,3	2,7	3,9
	160°C	2,2	0,3	1,7	3,1
	180°C	1,9	0,5	1,2	2,9
Fichte	unbehandelt	1,5	0,5	0,4	2,3
	160°C	1,6	0,4	0,7	2,3
	180°C	1,2	0,5	0,3	2,3
Kiefer	unbehandelt	2,1	0,6	0,7	4,2
	160°C	1,7	0,7	0,6	3,2
	180°C	1,4	0,7	0,0	2,6
Tanne	unbehandelt	1,2	0,2	0,7	1,6
	160°C	1,0	0,3	0,4	1,5
	180°C	0,8	0,4	0,2	2,1

Tabelle 35: Trocknungs-Schwindmaß in tangentialer Richtung der untersuchten Baumarten und für alle Untersuchungsvarianten

Holzart	Behandlung	Mittelwert [%]	STABW [%]	Min [%]	Max [%]
Buche	unbehandelt	6,6	0,8	5,3	8,0
	160°C	5,1	0,6	4,2	6,1
	180°C	2,5	0,8	1,7	5,4
Esche	unbehandelt	5,4	0,8	3,7	7,2
	160°C	3,7	0,6	2,7	4,6
	180°C	1,8	0,4	0,4	2,4
Eiche	unbehandelt	7,6	0,4	7,0	8,8
	160°C	4,7	0,8	3,3	6,1
	180°C	3,3	0,8	2,0	4,6
Fichte	unbehandelt	4,4	0,7	3,4	5,9
	160°C	3,9	0,8	2,9	5,6
	180°C	2,6	0,6	1,5	4,2
Kiefer	unbehandelt	4,6	0,6	3,5	5,9
	160°C	3,4	1,2	1,3	5,3
	180°C	2,7	0,6	1,7	4,0
Tanne	unbehandelt	3,5	0,5	2,7	4,8
	160°C	2,9	0,6	1,9	3,9
	180°C	1,8	0,4	1,2	3,0

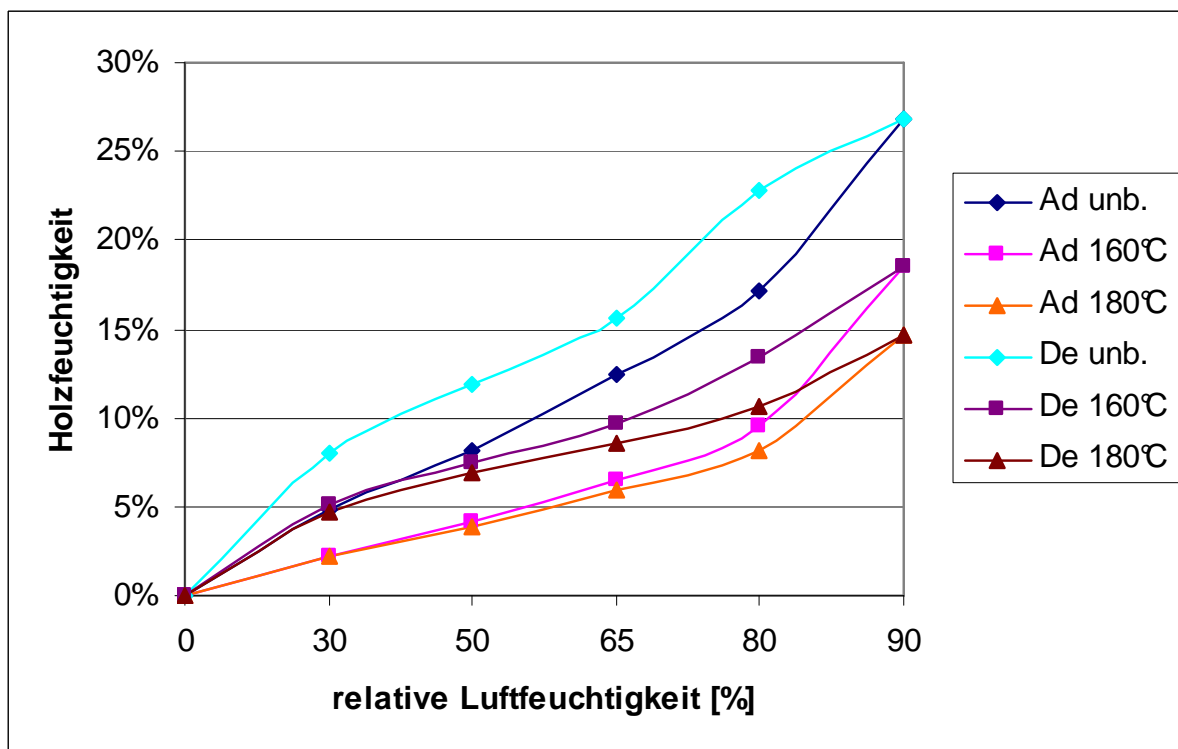


Abbildung 32: Ad- und Desorptionskurven für Esche für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C)

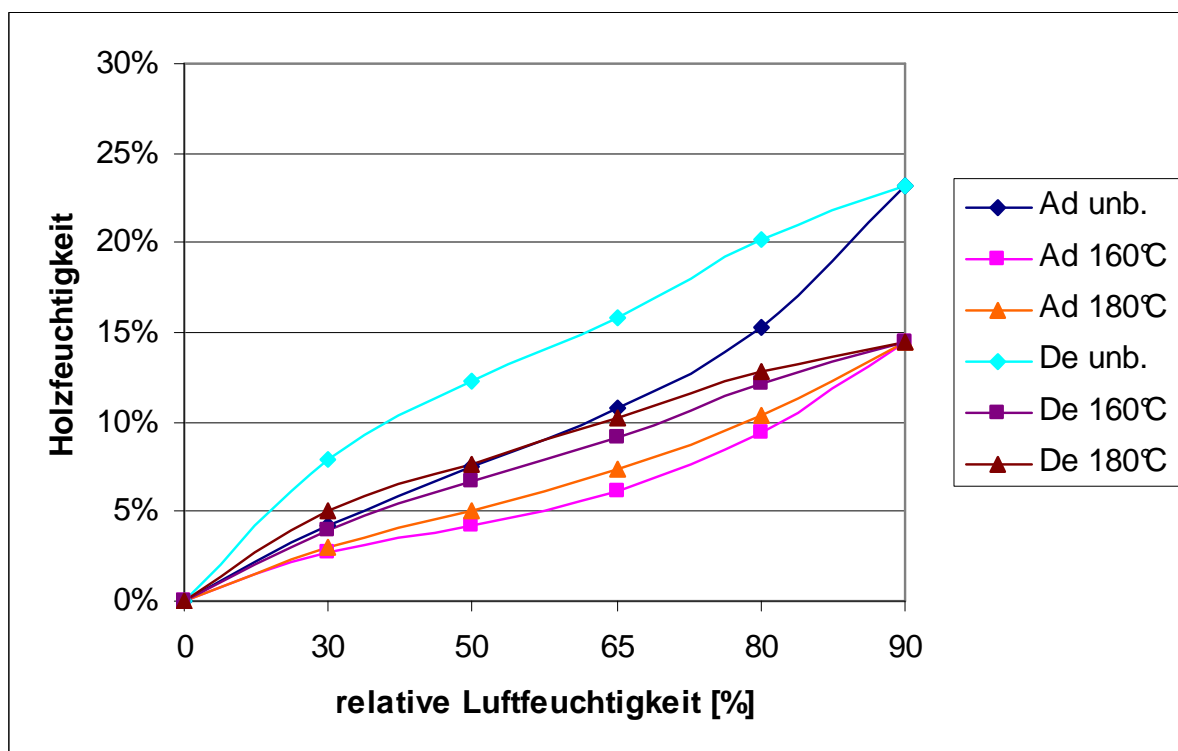


Abbildung 33: Ad- und Desorptionskurven für Eiche für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C)

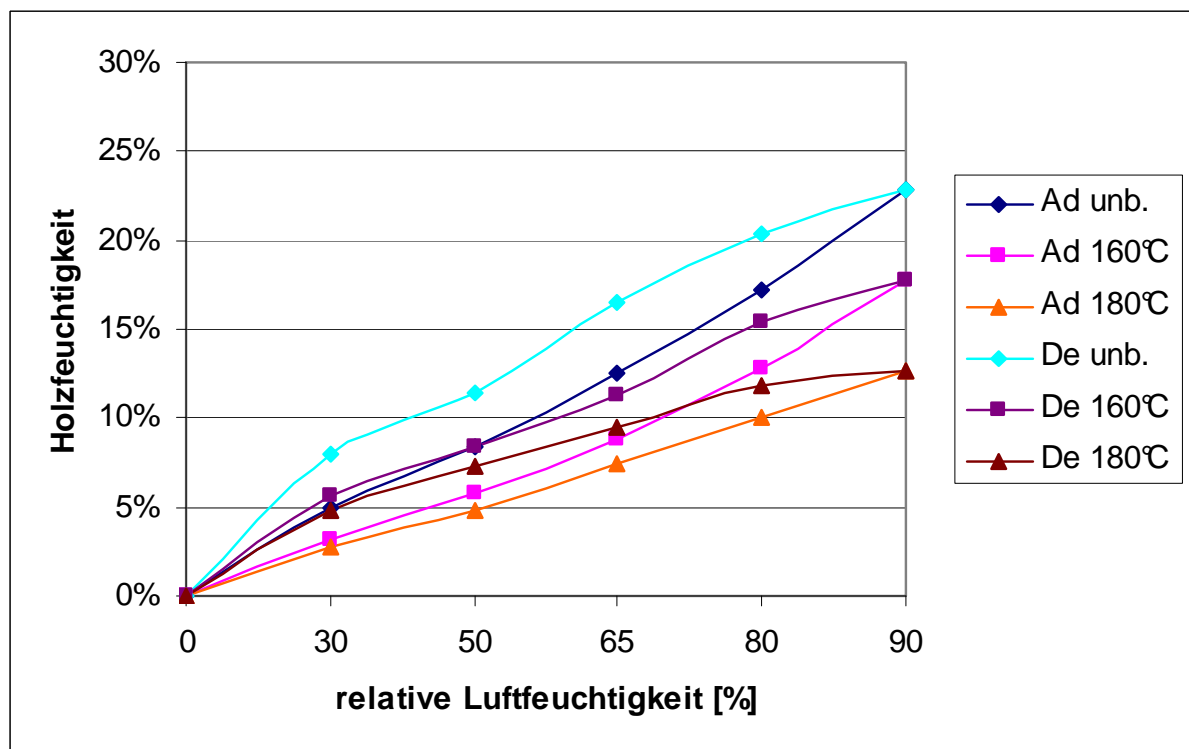


Abbildung 34: Ad- und Desorptionskurven für Fichte für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C)

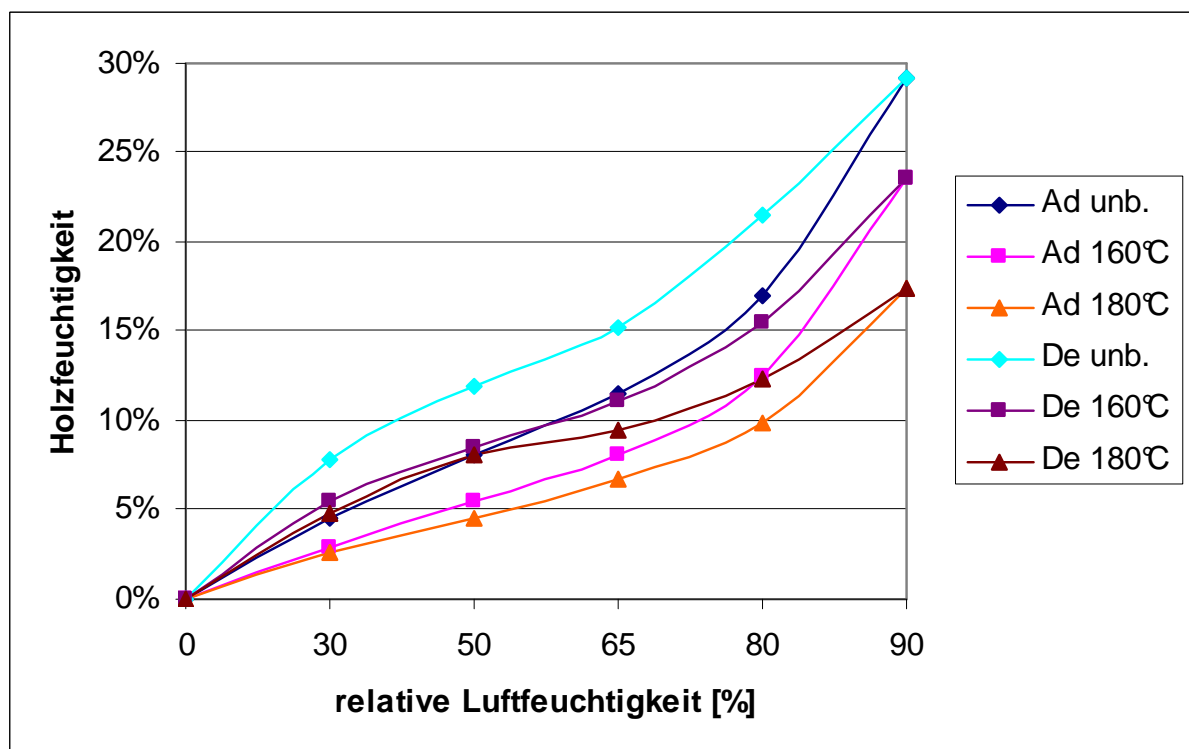


Abbildung 35: Ad- und Desorptionskurven für Kiefer für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C)

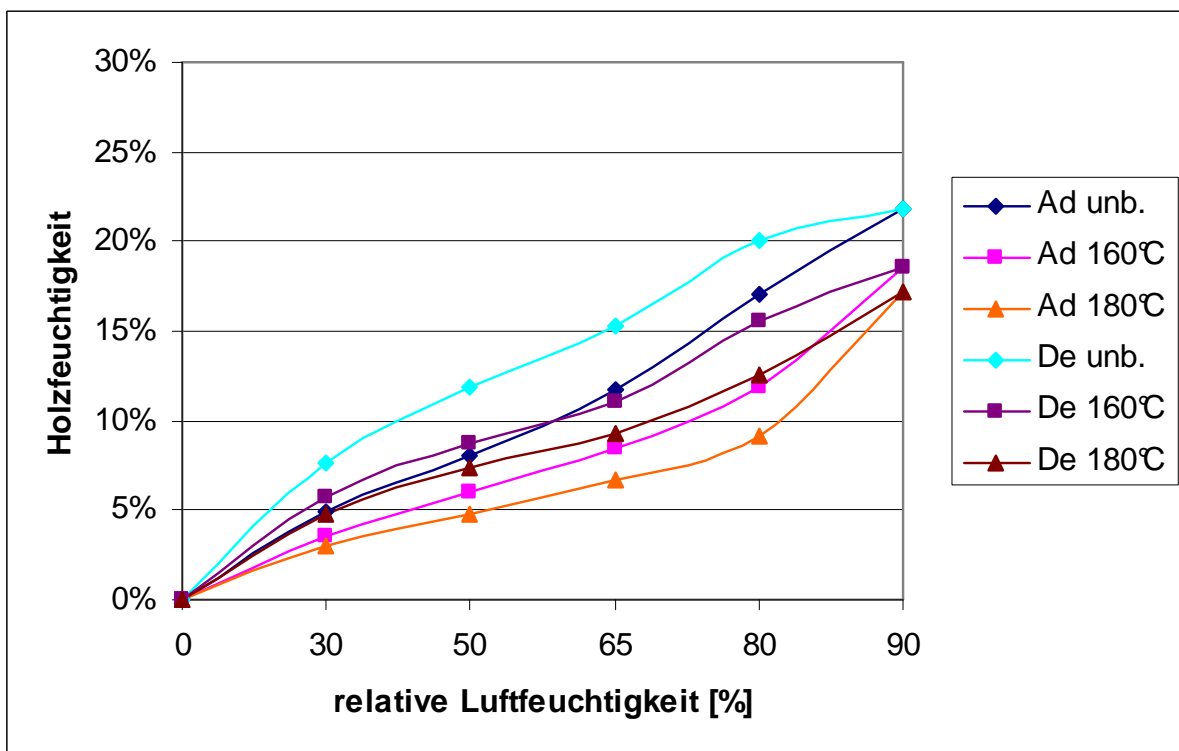


Abbildung 36: Ad- und Desorptionskurven für Tanne für alle Untersuchungsvarianten (unbehandelt, 160°C, 180°C)

6.3 Prüfberichte der holzbiologischen Untersuchungen



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Buchenholz

Buchenholz				CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
Prüfpilz	Behandlung	Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m ³]	n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt	Kern	729	19	36,1	3,3	19	0,7	35,4	3,3
		Übergang	696	10	33,4	4,2	10	0,7	32,6	4,2
		Splint	685	30	37,3	7,6	30	0,7	36,5	7,6
	160°C	Kern	599	19	13,6	6,9	19	3,7	9,9	6,9
		Übergang	654	12	18,7	3,2	12	3,7	15,0	3,2
		Splint	616	27	7,8	2,8	27	3,7	4,0	2,8
Brauner Kellerschwamm	180°C	Kern	615	19	2,4	2,3	19	2,1	0,7	2,1
		Übergang	631	28	1,4	0,5	28	2,1	0,0	0,1
		Splint	628	10	2,4	1,1	10	2,1	0,6	0,6
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	unbehandelt	Kern	739	15	29,9	1,2	15	0,7	29,2	1,2
		Splint	660	15	31,9	5,6	15	0,7	31,1	5,6
	160°C	Kern	649	15	7,2	5,0	15	3,7	4,5	3,5
		Splint	600	15	4,4	1,5	15	3,7	0,9	1,3
Balkenblättling	180°C	Kern	640	15	1,7	0,6	15	2,1	0,1	0,2
		Splint	601	15	2,4	1,3	15	2,1	0,5	1,2
<i>Coriolus versicolor</i>	unbehandelt	Kern	727	15	33,6	2,9	15	0,7	32,8	2,9
		Splint	664	18	35,9	10,5	18	0,7	35,2	10,5
	160°C	Kern	653	15	9,2	2,3	15	3,7	5,5	2,3
		Splint	604	18	11,0	2,2	18	3,7	7,3	2,2
Schmetterlingstramete	180°C	Kern	649	15	5,8	1,6	15	2,1	3,7	1,6
		Splint	601	18	6,0	1,1	18	2,1	3,9	1,1
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt	Kern	734	15	3,2	5,4	15	0,7	2,5	5,4
		Splint	680	15	7,7	12,9	15	0,7	7,5	12,7
	160°C	Kern	659	15	6,8	5,2	15	3,7	3,5	4,8
		Splint	588	15	0,9	1,2	14	3,7	0,0	0,0
Echter Hausschwamm	180°C	Kern	643	15	1,9	0,7	15	2,1	0,2	0,3
		Splint	620	15	3,8	1,5	15	2,1	1,7	1,4

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Buchenholz

CEN/TS 15083-1				EN 113 / EN 350-1			
Baumart	Behandlung	Zone	Median MV [%]	DHK	MV_{korrr} [%]	x-Wert	DHK
Buche	unbehandelt	alle Zonen ^a	36,9	5	35,5	1,00	5
	160°C	alle Zonen	10,9	3*	8,2	0,23	2
	180°C	alle Zonen	6,1	2*	3,8	0,11	1

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzarten; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen:
1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Eschenholz

Prüfpilz	Behandlung	Eschenholz Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m³]	CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
				n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt	Kern	651	14	28,0	3,5	14	1,6	26,5	3,5
		Splint	639	15	29,9	2,1	15	1,6	28,3	2,1
	160°C	Kern	622	14	4,6	4,0	14	4,4	1,6	2,8
		Splint	567	14	6,6	2,0	14	4,4	2,2	1,9
	180°C	Kern	607	9	1,2	0,7	9	2,6	0,0	0,0
		Übergang	562	5	1,6	0,6	5	2,6	0,0	0,0
		Splint	575	6	1,4	0,8	6	2,6	0,0	0,0
	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	Kern	679	10	27,0	4,5	10	1,6	25,4	4,5
	unbehandelt	Übergang	659	10	28,0	1,7	10	1,6	26,5	1,7
		Splint	646	10	21,3	4,6	10	1,6	19,7	4,6
	160°C	Kern	662	10	6,3	1,1	10	4,4	1,8	1,1
		Übergang	581	10	6,5	0,7	10	4,4	2,1	0,7
		Splint	598	10	7,5	1,4	10	4,4	3,0	1,4
	180°C	Kern	622	10	2,2	0,7	10	2,6	0,2	0,3
		Übergang	576	10	2,6	0,2	10	2,6	0,1	0,2
		Splint	571	10	2,7	0,5	10	2,6	0,3	0,3
<i>Coriolus versicolor</i>	unbehandelt	Kern	699	10	31,5	1,7	10	1,6	29,9	1,7
		Übergang	655	10	33,0	1,3	10	1,6	31,5	1,3
		Splint	663	10	32,5	1,1	10	1,6	30,9	1,1
	160°C	Kern	654	10	9,4	1,9	10	4,4	5,0	1,9
		Übergang	592	10	11,3	2,1	10	4,4	6,8	2,1
		Splint	591	10	13,1	1,4	10	4,4	8,6	1,4
	180°C	Kern	607	10	4,6	1,5	10	2,6	2,1	1,5
		Übergang	579	10	4,7	1,0	10	2,6	2,2	1,0
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt	Splint	590	10	4,1	0,9	10	2,6	1,5	0,9
		Kern	700	10	0,8	0,6	10	1,6	0,0	0,0
		Übergang	652	10	2,5	0,3	10	1,6	1,0	0,3
	160°C	Splint	661	10	3,2	0,2	10	1,6	1,6	0,2
		Kern	633	10	4,8	0,3	10	4,4	0,4	0,3
		Übergang	591	10	4,9	0,8	10	4,4	0,6	0,6
	180°C	Splint	575	10	5,8	0,7	10	4,4	1,3	0,7
		Kern	612	10	2,1	0,6	10	2,6	0,1	0,3
		Übergang	575	10	2,3	0,1	10	2,6	0,0	0,0
		Splint	592	10	2,2	0,2	10	2,6	0,0	0,0

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Eschenholz

Baumart ^a	Behandlung	Zone	CEN/TS 15083-1		EN 113 / EN 350-1		
			Median MV [%]	DHK	MV_{korrr} [%]	x-Wert	DHK
Esche	unbehandelt	Kern	32,0	5*	29,9	0,84	4
		Übergang	32,8	5*	31,5	0,89	4
		Splint	32,4	5*	30,9	0,87	4
	160°C	Kern	9,2	2*	5,0	0,14	1
		Übergang	10,6	3*	6,8	0,19	2
		Splint	13,0	3*	8,6	0,24	2
	180°C	Kern	4,3	1	2,1	0,06	1
		Übergang	4,3	1	2,2	0,06	1
		Splint	4,0	1	1,5	0,04	1

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzart Buchenholz; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen:
1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg
Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Eichenholz

Eichenholz				CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
Prüfpilz	Behandlung	Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m ³]	n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt	Kern	629	30	9,6	4,5	30	2,9	6,7	4,5
		Übergang	580	30	6,8	2,2	30	2,9	3,9	2,2
	160°C	Kern	577	30	11,9	6,9	30	2,7	9,2	6,9
		Übergang	492	30	5,6	3,8	30	2,7	3,0	3,7
	180°C	Kern	587	16	3,5	1,0	16	2,2	1,4	0,9
		Übergang	533	25	3,3	1,1	25	2,2	1,3	0,9
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	unbehandelt	Kern	669	14	4,2	5,2	14	2,9	1,8	5,0
		Übergang	552	15	2,6	0,5	15	2,9	0,1	0,2
	160°C	Kern	607	14	7,0	2,5	14	2,7	4,3	2,5
		Übergang	493	15	4,7	1,0	15	2,7	2,0	1,0
	180°C	Kern	668	4	5,1	5,5	4	2,2	3,5	4,9
		Übergang	531	9	2,8	0,6	9	2,2	0,6	0,5
<i>Coriolus versicolor</i>	unbehandelt	Kern	672	15	28,6	9,3	15	2,9	25,7	9,3
		Übergang	553	10	28,7	6,5	10	2,9	25,8	6,5
	160°C	Kern	623	14	7,4	1,6	14	2,7	4,7	1,6
		Übergang	466	10	9,5	2,6	10	2,7	6,8	2,6
	180°C	Kern	657	4	3,2	1,0	4	2,2	1,1	0,9
		Übergang	533	10	3,9	1,7	10	2,2	1,7	1,7
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt	Kern	658	13	2,1	0,5	13	2,9	0,0	0,0
		Übergang	563	20	2,4	0,7	20	2,9	0,1	0,2
	160°C	Kern	609	13	5,0	1,8	13	2,7	2,3	1,8
		Übergang	478	20	3,4	1,3	20	2,7	0,9	1,2
	180°C	Kern	628	4	2,5	1,1	4	2,2	0,6	0,9
		Übergang	518	8	3,1	1,8	8	2,2	1,3	1,3

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Eichenholz

Baumart ^a	Behandlung	Zone	CEN/TS 15083-1		EN 113 / EN 350-1		
			Median MV [%]	DHK	MV_{korrr} [%]	x-Wert	DHK
Eiche	unbehandelt	Kern	32,6	5*	25,7	0,72	4
		Übergang	28,8	4	25,8	0,73	4
	160°C	Kern	9,5	2	9,2	0,26	2
		Übergang	9,7	2	6,8	0,19	2
	180°C	Kern	3,9	1	3,5	0,10	1
		Übergang	3,6	1	1,4	0,04	1

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzart Buchenholz; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen:
1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Kiefernholz

Kiefernholz				CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
Prüfpilz	Behandlung	Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m³]	n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt ^a	Kern	556	15	27,5	5,8	15	1,5	26,0	5,8
		Splint	552	15	29,1	4,4	15	1,5	27,6	4,4
	160°C	Kern	474	18	22,6	6,1	18	5,4	17,2	6,1
		Splint	508	15	24,6	4,6	15	5,4	19,2	4,6
	180°C	Kern	438	19	3,5	3,1	19	2,6	1,5	2,6
		Splint	504	15	3,0	1,9	15	2,6	0,8	1,5
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	unbehandelt ^a	Kern	512	15	8,3	9,7	15	1,5	7,0	9,5
		Splint	556	15	21,2	2,3	15	1,5	19,6	2,3
	160°C	Kern	484	15	24,2	3,3	15	5,4	18,8	3,3
		Splint	491	20	21,5	3,3	20	5,4	16,1	3,3
	180°C	Kern	408	10	3,5	1,4	10	2,6	1,2	1,1
		Splint	505	15	3,1	0,7	15	2,6	0,5	0,7
<i>Poria placenta</i>	unbehandelt ^a	Kern	485	15	24,2	8,3	15	1,5	22,8	7,9
		Splint	601	10	24,5	3,0	10	1,5	23,0	3,0
	160°C	Kern	481	15	24,6	8,2	15	5,4	19,3	8,2
		Splint	570	10	21,6	3,6	10	5,4	16,2	3,6
	180°C	Kern	427	10	7,0	3,8	10	2,6	4,5	3,7
		Splint	507	15	7,6	3,1	15	2,6	4,9	3,1
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt ^a	Kern	502	15	15,6	13,2	15	1,5	14,3	12,8
		Splint	600	10	31,3	15,9	10	1,5	29,8	15,9
	160°C	Kern	475	15	10,5	8,3	15	5,4	5,6	7,9
		Splint	569	10	6,4	2,0	10	5,4	1,3	1,8
	180°C	Kern	421	10	1,7	1,3	10	2,6	0,2	0,4
		Splint	511	15	2,9	0,6	15	2,6	0,4	0,5

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Kiefernholz

Baumart ^a	Behandlung	Zone	CEN/TS 15083-1		EN 113 / EN 350-1		
			Median MV [%]	DHK	MV_{korr} [%]	x-Wert	DHK
Kiefer	unbehandelt	Kern	27,3	4	26,0	0,87	4
		Splint ^a	39,1	5	29,8	1,00	5
	160°C	Kern	24,4	4	19,3	0,65	4
		Splint	25,6	4	19,2	0,64	4
	180°C	Kern	7,9	2*	4,5	0,15	1
		Splint	8,5	2	4,9	0,17	2

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzart Kiefern Splintholz; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen:
1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Fichtenholz

Fichtenholz				CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
Prüfpilz	Behandlung	Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m ³]	n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt	Kern	396	29	32,1	4,2	29	0,9	31,2	4,2
		Splint	469	30	35,2	7,9	30	0,9	34,3	7,9
	160°C	Kern	389	24	25,3	4,4	24	4,3	21,0	4,4
		Splint	456	27	20,7	6,2	27	4,3	16,4	6,2
	180°C	Kern	358	27	2,8	2,0	27	3,1	0,7	1,1
		Splint	456	30	1,5	1,7	30	3,1	0,3	1,1
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	unbehandelt	Kern	402	15	32,4	3,3	15	0,9	31,5	3,3
		Splint	477	15	31,4	2,3	15	0,9	30,5	2,3
	160°C	Kern	368	15	23,9	4,8	15	4,3	19,6	4,8
		Splint	475	15	17,3	5,4	15	4,3	13,0	5,4
	180°C	Kern	351	15	5,5	2,6	15	3,1	2,6	2,5
		Splint	476	15	3,7	1,8	15	3,1	1,0	1,4
<i>Poria placenta</i>	unbehandelt	Kern	412	13	26,0	5,7	13	0,9	25,1	5,7
		Splint	475	19	26,0	4,1	19	0,9	25,2	4,1
	160°C	Kern	367	13	24,7	5,0	13	4,3	20,4	5,0
		Splint	463	19	25,2	4,8	19	4,3	20,9	4,8
	180°C	Kern	343	10	13,9	4,9	10	3,1	10,8	4,9
		Splint	458	19	8,8	3,4	19	3,1	5,7	3,4
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt	Kern	409	15	35,6	9,8	15	0,9	34,7	9,8
		Splint	483	15	33,4	14,6	15	0,9	32,6	14,4
	160°C	Kern	371	15	21,1	6,8	15	4,3	16,8	6,8
		Splint	464	15	16,3	9,3	15	4,3	12,0	9,3
	180°C	Kern	340	15	6,4	12,0	15	3,1	3,7	11,9
		Splint	464	15	2,7	1,1	15	3,1	0,3	0,4

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Fichtenholz

Baumart ^a	Behandlung	Zone	CEN/TS 15083-1		EN 113 / EN 350-1		
			Median MV [%]	DHK	MV_{korrr} [%]	x-Wert	DHK
Fichte	unbehandelt	Kern	38,9	5	34,7	1,16	5
		Splint	39,2	5	34,3	1,15	5
	160°C	Kern	25,3	4	21,0	0,70	4
		Splint	24,5	4	20,9	0,70	4
	180°C	Kern	13,3	3	10,8	0,36	3
		Splint	8,9	2	5,7	0,19	2

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzart Kiefern Splintholz; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen: 1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764

Fax: 0761/ 2033763

info@fobawi.uni-freiburg.de

Ergebnisse der Resistenzprüfungen für Tannenholz

Tannenholz				CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1			
Prüfpilz	Behandlung	Stamm-Zone	ρ_0 [kg/m³]	n	MV_{unkorr} [%]	s [%]	n	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
<i>Coniophora puteana</i>	unbehandelt	Kern	448	6	34,7	3,8	6	1,5	33,2	3,8
		Splint	439	12	40,5	3,6	12	1,5	39,0	3,6
	160°C	Kern	389	15	15,5	5,0	15	2,3	13,1	5,0
		Splint	418	11	11,4	8,0	11	2,3	9,1	8,0
	180°C	Kern	364	14	1,3	3,2	14	1,9	0,8	2,8
		Splint	419	15	1,1	0,8	15	1,9	0,1	0,2
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	unbehandelt	Kern	444	11	17,2	9,4	11	1,5	15,7	9,4
		Splint	433	14	13,3	12,7	14	1,5	11,9	12,6
	160°C	Kern	389	11	11,7	5,2	11	2,3	9,4	5,2
		Splint	418	14	6,3	5,2	14	2,3	4,0	5,1
	180°C	Kern	351	11	1,8	0,3	11	1,9	0,1	0,1
		Splint	416	13	2,6	0,6	13	1,9	0,7	0,6
<i>Poria placenta</i>	unbehandelt	Kern	426	8	33,4	4,1	8	1,5	31,9	4,1
		Splint	423	17	30,6	4,8	17	1,5	29,1	4,8
	160°C	Kern	384	8	24,8	5,0	8	2,3	22,5	5,0
		Splint	413	14	18,2	6,2	14	2,3	15,8	6,2
	180°C	Kern	373	8	2,1	0,9	8	1,9	0,4	0,7
		Splint	409	12	2,9	2,2	12	1,9	1,4	1,9
<i>Serpula lacrymans</i>	unbehandelt	Kern	426	8	7,6	18,7	8	1,5	6,7	18,4
		Splint	434	15	3,3	7,7	15	1,5	2,2	7,6
	160°C	Kern	379	8	5,2	5,9	8	2,3	2,9	5,9
		Splint	405	15	2,9	1,1	15	2,3	0,7	0,9
	180°C	Kern	363	8	1,6	0,2	8	1,9	0,0	0,0
		Splint	396	15	2,7	1,0	15	1,9	0,9	0,8

Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit für Tannenholz

		CEN/TS 15083-1			EN 113 / EN 350-1		
Baumart ^a	Behandlung	Zone	Median MV [%]	DHK	MV_{korrr} [%]	x-Wert	DHK
Tanne	unbehandelt	Kern	34,4	5	33,2	1,11	5
		Splint	40,9	5	39,0	1,31	5
	160°C	Kern	24,0	4	22,5	0,75	4
		Splint	18,8	4*	15,8	0,53	3
	180°C	Kern	1,9	1	0,8	0,03	1
		Splint	2,5	1	1,4	0,05	1

*Abweichung in der Klassifizierung der natürlichen Dauerhaftigkeit zwischen beiden Normen; ^a Bezugsholzart Kiefern Splintholz; DHK = Code Dauerhaftigkeitsklassen:
1 = sehr dauerhaft, 2 = dauerhaft, 3 = mäßig dauerhaft, 4 = wenig dauerhaft, 5 = nicht dauerhaft



Kontakt:

Prüfende Institute

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft sowie
Institut für Forstbotanik und Baumphysiologie, Professur für Forstbotanik

Kooperationspartner:

Ets. Röthlisberger SA, Rue de la Gare 28 CH-2855 Glovelier, Schweiz;
WTT A/S, Jyllandsvej 9, DK 7330 Brande, Dänemark

Vorbemerkungen

Der vorliegende Prüfbericht dokumentiert die Ergebnisse der Untersuchung zur Resistenz von hygrothermisch modifiziertem Holz gegenüber Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen, durchgeführt im Rahmen des Forschungsprojekts „Thermoholz nach dem WTT-Verfahren“. Die Durchführung der Untersuchung und die Bewertung der Prüfergebnisse erfolgte in Anlehnung an die Vornorm ENV 807. Die neue europäische Spezifikation CEN/TS 15083-2 stimmt in wesentlichen Teilen mit der Vornorm ENV 807 überein. Auf Basis der CEN/TS 15083-2 kann eine vorläufige Einstufung der geprüften Holzproben in natürliche Dauerhaftigkeitsklassen nach EN 350-1 vorgenommen werden. Die Gültigkeitsdauer der CEN/TS 15083-2 von drei Jahren ist im Juni 2008 abgelaufen. Bis zur Erstellung dieses Prüfberichts ist keine Umwandlung der Vornorm (CEN/TS) in eine europäische Norm erfolgt. Daher kann die vorläufige Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen nach CEN/TS 15083-2 Anhang E nur als informativ angesehen werden.

Material und Versuchsbedingungen

Normative Anweisungen nach der die Prüfung durchgeführt und die für die Klassifikation der Natürlichen Dauerhaftigkeit herangezogen wurden:

ENV 807: Holzschutzmittel – Vornorm – Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnende Mikroorganismen. ENV 807:2001
CEN/TS 15083-2: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzerstörende Pilze, Prüfverfahren – Teil 2: Moderfäulepilze. CEN/TS 15083-2:2005
CEN/TS 15679: Thermisch modifiziertes Holz – Definitionen und Eigenschaften. CEN/TS 15679:2007

Verwendete Holzarten und Stammzonen gemäß EN 350-1:

Splint-, und Kernholz von Fichte (*Picea abies*); Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Tanne (*Abies alba*); Rotbuche (*Fagus sylvatica*) sowie Esche (*Fraxinus excelsior*): Kern-, Übergangs- und Splintholz; Eiche (*Quercus spec.*); Kern-, und Übergangsholz (Stammzonen gemäß EN 350-1)

Anzahl und Herkunft der für die Versuche verwendeten Bäume:

Erdstammstücke von jeweils drei verschiedenen Bäumen; Schweiz (Kanton Jura); Höhen zwischen 400-600 NN; Tanne: unbekannte Standortsherkunft (Region Schwarzwald); technisch getrocknet (Frischlufte-Abluft 60-62°C, 1 Woche)

Beschreibung des Holzes

Eichenbretter überwiegend mit fauligem Splintholz, Rotbuche ohne erkennbare Verkernung, Eschenholz leichter (olivgrüne) Verkernung erkennbar, gerader Faserverlauf; bei Nadelhölzern überwiegend gerader Faserverlauf; Kiefer teilweise mehr 8 Jahrringe je 10 mm

Geprüftes Holzprodukt:

Normproben von, nach dem WTT-Verfahren, hygrothermisch modifiziertem Schnittholz

Behandlungsstufen:

technisch getrocknetes Holz ($u = 12\% \pm 2$) folgender Varianten:

Variante	0	unbehandeltes Vergleichsholz
Variante	160°C	bei 160°C bzw. 180°C hygrothermisch behandeltes Holz
Variante	180°C	

Probeentnahmebedingungen und Alterungsbeanspruchung:

In Anlehnung an EN 350-1 und EN 84

Typ und Charakteristik des Erdesubstrats:

natürliche Oberflächenerde gemäß ENV807;
pH-Wert: 7,4; Wasserhaltekapazität: WHK = 30,1 %

Prüfzeitraum:

Zwischen Mrz'08 und Jan'09

Dauer der Prüfung:

Insgesamt 32 Wochen mit Zwischenentnahmen bei 8, 16 und 24 Wochen

Abweichungen von der Norm:

Der geforderte Winkel der Jahrringe von $90 \pm 15^\circ$ zu den breiten Flächen des Prüfkörpers konnte nur für etwa 80 % der Prüfkörper eingehalten werden;
Geforderte Anzahl von Bäumen nach ENV807 = 3 nach CEN/TS 15083-2 = 5; untersuchte Bäume: Esche = 2; alle anderen Baumarten = 3

Bericht erstellt durch:

Denny Ohnesorge, Inga Krowas

Datum:

14. April 2010



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg
Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Zusammenfassung der Ergebnisse der Labortests im Erdkontakt

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Untersuchung zur Resistenz von hygro-thermisch modifiziertem Holz gegenüber Moderfäule und anderen erdbewohnende Mikroorganismen. Dargestellt wird der mittlere prozentuale Masseverlust in Bezug zur Ausgangstrockenmasse der Prüfkörper. Wurde am Ende der Versuchsdauer an Prüfkörpern eine Zunahme der Darmmasse festgestellt, so sind diese Werte gemäß ENV 807 bzw. CEN/TS 15083-2 mit 0 % Masseverlust in die Auswertung eingegangen. Im Gegensatz zur CEN/TS 15083-2 wird gemäß ENV 807 der so ermittelte Masseverlust (MV_{unkorr}) mit einem Korrekturfaktor K berichtigt. Der Korrekturfaktor steht für eine Massenänderung, die nicht auf die Beanspruchung im Erdkontakt zurückzuführen ist, und wurde an gesondert gelagerten Kontrollprüfkörpern ermittelt. Darüber hinaus wurde in Anlehnung an CEN/TS 15679 in dieser Untersuchung auf die Anwendung des nach ENV 807 üblichen Gültigkeitskriteriums „Feuchtegehalt“ verzichtet (Holzfeuchtegehalt der Prüfkörper zwischen 40 und 150 % unmittelbar nach der Entnahme aus dem Erdesubstrat). Das Vorliegen von Moderfäulebefall wurde mikroskopisch an ausgewählten Proben bestätigt. In der nachfolgenden Tabelle sind sowohl die unkorrigierten prozentualen Masseverluste nach CEN/TS 15083-2 als auch die korrigierten Masseverluste gemäß ENV 807 aller untersuchten Prüfkörper nach **32-wöchiger Inkubation** aufgeführt:

Baumart	Behandlung	Stamm-Zone	n	ρ_0 [kg/m³]	MV_{unkorr} [%]	s [%]	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
Buche	unbehandelt ^a	Kern	9	739	63,4	11,1	0,5	62,9	11,1
		Splint	9	684	58,4	10,1	0,2	58,2	10,1
	160°C	Kern	9	654	25,9	8,9	4,3	21,6	8,9
		Splint	9	647	19,6	7,0	3,7	15,9	7,0
	180°C	Kern	9	630	4,4	3,2	1,0	3,3	3,2
		Splint	9	620	3,6	0,7	1,7	1,9	0,7
Esche	unbehandelt	Kern	6	703	26,3	6,5	0,9	25,4	6,5
		Übergang	6	649	31,2	4,2	1,9	29,3	4,2
		Splint	6	630	38,9	4,0	3,0	35,9	4,0
	160°C	Kern	6	656	10,0	2,0	3,6	6,4	2,0
		Übergang	6	578	12,8	1,3	3,5	9,3	1,3
		Splint	6	579	15,9	1,9	3,9	12,1	1,9
	180°C	Kern	5	600	4,3	0,5	2,1	2,2	0,5
		Übergang	6	556	3,2	0,5	1,6	1,6	0,5
		Splint	7	563	3,1	0,6	1,6	1,5	0,6
Eiche	unbehandelt	Kern	9	608	24,7	6,8	3,0	21,8	6,8
		Übergang	9	548	26,1	3,7	4,5	21,6	3,7
	160°C	Kern	9	628	9,7	2,8	4,4	5,3	2,8
		Übergang	9	488	7,6	2,5	4,0	3,7	2,5
	180°C	Kern	3	550	4,2	1,1	3,2	1,0	1,1
		Übergang	3	521	2,9	0,8	1,4	1,5	0,8

Erläuterungen: ^a Bezugsholzprüfkörper; n = Prüfkörperanzahl; ρ_0 = Darrdichte; MV_{unkorr} / MV_{korrr} = Mittelwert der unkorrigierten bzw. korrigierten Masseverluste; K = Korrekturfaktor; s = Standardabweichung



Baumart	Behandlung	Stamm-Zone	n	ρ_0 [kg/m ³]	MV_{unkorr} [%]	s [%]	K [%]	MV_{korrr} [%]	s [%]
Kiefer	unbehandelt	Kern	6	518	8,5	1,6	1,2	7,4	1,6
		Splint ^a	7	545	13,3	2,5	1,3	12,0	2,5
	160°C	Kern	8	481	9,1	4,5	2,7	6,4	4,5
		Splint	8	502	9,8	3,2	5,3	4,5	3,2
	180°C	Kern	6	447	5,0	1,2	1,6	3,4	1,2
		Splint	9	500	5,5	2,1	3,3	2,2	2,1
Fichte	unbehandelt	Kern	8	419	13,7	3,6	0,4	13,3	3,6
		Splint	9	459	17,2	6,5	0,4	16,8	6,5
	160°C	Kern	9	362	9,1	2,1	4,6	4,5	2,1
		Splint	9	469	7,6	1,6	5,2	2,4	1,6
	180°C	Kern	9	362	4,9	1,4	2,3	2,6	1,3
		Splint	9	452	4,0	1,2	1,6	2,4	1,2
Tanne	unbehandelt	Kern	9	414	11,2	1,9	1,6	9,6	1,9
		Splint	9	417	10,7	1,7	0,5	10,2	1,7
	160°C	Kern	8	379	4,5	2,1	2,1	2,6	2,0
		Splint	9	400	4,7	1,8	3,6	1,1	1,7
	180°C	Kern	7	349	1,2	1,1	1,0	0,6	0,6
		Splint	9	388	1,6	1,5	1,4	1,0	1,4

Erläuterungen: ^a Bezugsholzprüfkörper; n = Prüfkörperanzahl; ρ_0 = Darrdichte; $MV_{\text{unkorr.}}$ / $MV_{\text{korrr.}}$ = Mittelwert der unkorrigierten bzw. korrigierten Masseverluste; K = Korrekturfaktor; s = Standardabweichung

Klassifizierung der Natürlichen Dauerhaftigkeit

Die Vornorm CEN/TS 15083-2 beschreibt ein Bewertungsschema zur vorläufigen Einstufung der natürlichen Dauerhaftigkeit der geprüften Holzproben nach Erdkontaktversuchen in Dauerhaftigkeitsklassen gemäß EN 350-1. Hierzu wird für die Ergebnisse Versuchsdauer ein so genannter x-Wert errechnet, welcher sich aus dem prozentualen Masseverlust (Laubhölzer) bzw. der Änderung des statischen E-Moduls (Nadelhölzer) der zu prüfenden Holzprobe im Verhältnis zum Masseverlust bzw. der Änderung des statischen E-Moduls der Bezugsholzprobe ergibt. Buchenholz fungiert hierbei als Bezugsholzart für Laubhölzer und Kiefern Splintholz als Bezugsholzart für Nadelhölzer. Die Einstufung erfolgt anhand der Grenzwerte des Anhangs E der technischen Spezifikation CEN/TS 15083-2. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Dauerhaftigkeit der Nadelhölzer nicht anhand des statischen E-Moduls, sondern anhand Masseverlusts (Median) der Prüfhölzer errechnet. Da es sich hierbei um ein vorläufiges Bewertungsschema handelt, sind die nachfolgenden Ergebnisse nur informativ!

ANMERKUNGEN: Die aufgeführten Prüfergebnisse sind Ergebnis eines Forschungsprojektes mit wissenschaftlicher Zielstellung und gelten nur für die geprüften Holzproben. Die Auslegung eines Prüfberichts und die praktischen Schlüsse, die daraus gezogen werden können, verlangen ein spezialisiertes Wissen zum Thema Holz und Holzmodifizierung. Bei Fragen zu Einzelheiten der Prüfungen sowie zur Interpretation der Ergebnisse sind die prüfenden Institute oder die beteiligten Partner zu kontaktieren.



Kontakt:

Universität Freiburg,
Institut für Forstbenutzung und
Forstliche Arbeitswissenschaft,
Werthmannstr. 6, 79085 Freiburg

Tel: 0761/ 2033764
Fax: 0761/ 2033763
info@fobawi.uni-freiburg.de

Baumart	Behandlung	Zone	Masseverlust Median [%]	x-Wert	DHK (CEN/TS 15083-2)	Bezeichnung
Buche	unbehandelt	Kern + Splint ^a	57,9	1,00	5	Nicht dauerhaft
	160°C	Kern + Splint	16,7	0,29	3	Mäßig dauerhaft
	180°C	Kern + Splint	3,1	0,05	1	Sehr dauerhaft
Esche	unbehandelt	Kern	19,8	0,34	3	Mäßig dauerhaft
		Übergang	28,4	0,49	4	Wenig dauerhaft
		Splint	30,8	0,53	4	Wenig dauerhaft
	160°C	Kern	7,5	0,13	2	Dauerhaft
		Übergang	12,9	0,22	3	Mäßig dauerhaft
		Splint	12,4	0,21	3	Mäßig dauerhaft
	180°C	Kern	3,4	0,06	1	Sehr dauerhaft
		Übergang	3,2	0,05	1	Sehr dauerhaft
		Splint	3,3	0,06	1	Sehr dauerhaft
Eiche	unbehandelt	Kern	19,5	0,34	3	Mäßig dauerhaft
		Übergang	19,7	0,34	3	Mäßig dauerhaft
	160°C	Kern	7,3	0,13	2	Dauerhaft
		Übergang	7,4	0,13	2	Dauerhaft
	180°C	Kern	3,4	0,06	1	Sehr dauerhaft
		Übergang	3,4	0,06	1	Sehr dauerhaft
Kiefer	unbehandelt	Kern	8,9	0,66	4	Wenig dauerhaft
		Splint ^a	13,4	1,00	5	Nicht dauerhaft
	160°C	Kern	6,3	0,47	4	Wenig dauerhaft
		Splint	9,4	0,70	4	Wenig dauerhaft
	180°C	Kern	4,8	0,36	3	Mäßig dauerhaft
		Splint	5,6	0,42	3	Mäßig dauerhaft
Fichte	unbehandelt	Kern	13,7	1,03	5	Nicht dauerhaft
		Splint	18,4	1,38	5	Nicht dauerhaft
	160°C	Kern	8,4	0,63	4	Wenig dauerhaft
		Splint	7,4	0,55	4	Wenig dauerhaft
	180°C	Kern	5,5	0,41	3	Mäßig dauerhaft
		Splint	3,9	0,29	3	Mäßig dauerhaft
Tanne	unbehandelt	Kern	11,2	0,84	5	Nicht dauerhaft
		Splint	10,4	0,78	4	Wenig dauerhaft
	160°C	Kern	4,6	0,35	3	Mäßig dauerhaft
		Splint	3,6	0,27	3	Mäßig dauerhaft
	180°C	Kern	1,6	0,12	2	Dauerhaft
		Splint	0,9	0,07	1	Sehr dauerhaft

^a Bezugsholzprüfkörper; DHK = Dauerhaftigkeitsklasse