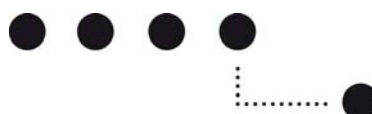


SMOKE DRYING

Holz mit Rauchgasen trocknen und konservieren

Forschungsbericht (Schlussbericht)

Berner Fachhochschule
Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB
Burgdorf, Biel



Bericht Nr.	2614-SB-01
Auftrag Nr.	2614.DWH
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	21.12.2006
Auftraggeber	BAFU Herr Michael Gautschi Postfach 3003 Bern
Adresse der Forschungsstelle	Hochschule für Architektur, Bau und Holz HSB Abteilung F+E, Architektur Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 0 341 / 391
Verfasser	Dr. E. Zürcher, Dr. F. Pichelin
Projektverantwortlicher	Dr. Ernst Zürcher
Abteilungsleiter	Marc-André Gonin

HSB | Forschung und Entwicklung

ABSTRACT

Das Ausgangsziel dieser Forschungslinie über die Behandlungsmöglichkeiten von Holz mittels Rauch ist es, eine Technik zu identifizieren, die folgende Merkmale besitzt:

- technologische Einfachheit, Robustheit
- mit tiefem Energiebedarf funktionierend
- auch für Holzarten geeignet, die als empfindlich gelten
- zu einer dimensional Stabilisierung der Produkte führend, evtl. auch der Farbe
- Holz Trocknung und Holzschutz in einem einzigen Arbeitsgang kombinierend
- eine vorteilhafte ökologische und energetische Bilanz präsentierend.

Eine Serie sukzessiver Untersuchungen mit traditionellen oder modernen Einrichtungen, die in der fleischverarbeitenden Industrie verwendet werden, sowie mit einer eigenen Anlage an der HSB hat es ermöglicht, die Anwendungspotentiale der Räucherung am Material Holz zur Trocknung und zum Schutz abzuklären. Die Tests wurden mit eng- und breitringigen gesägten Proben, sowie mit gespaltenen Proben (Schindeln) durchgeführt. Die analysierten Kriterien sind die Ausgangsfeuchte, die Variation der Feuchte im Laufe der Behandlung, die Tiefe der Raucheindringung, die Hygroskopizität der behandelten Proben, die Dimensionsstabilität, die Permeabilität, das Witterungsverhalten (Farbvariation in Bewitterungskammern) und die Resistenz gegenüber Pilzabbau. Repräsentative Ergebnisse (ergänzt durch energetische und ökonomische Schätzungen), welche die Fortsetzung dieser Forschungslinie rechtfertigen, werden in diesem Schlussbericht dargestellt.

Le but initial de cette ligne de recherche sur les possibilités de traitement du bois par la fumée est d'identifier une technique présentant les caractéristiques suivantes:

- simplicité technologique, robustesse
- fonctionnant à basse énergie
- s'adaptant aussi à des essences réputées délicates
- offrant une stabilisation dimensionnelle des produits, évent. de la couleur
- associant au séchage une protection / préservation augmentant la durabilité
- présentant un bilan écologique et énergétique avantageux.

Une série d'essais successifs avec divers équipements traditionnels ou modernes utilisés dans le fumage industriel de la viande ainsi qu'avec une enceinte expérimentale mise au point à la HSB-Bienne a permis d'explorer les possibilités de l'usage de la fumée dans le séchage et la préservation du bois. Les tests furent effectués avec des échantillons sciés à cernes larges / étroits, et fendus (bardeaux). Les critères analysés sont la teneur en eau initiale, l'évolution de l'humidité en cours du traitement, la profondeur de pénétration de la fumée en fonction du temps, l'hygroscopicité des échantillons traités, la stabilité dimensionnelle, la perméabilité, le comportement face aux intempéries (vieillesse accélérée) et aux attaques de champignons. Des résultats représentatifs (complétés par des estimations énergétiques et économiques) justifiant la poursuite de cette ligne de recherche sont présentés dans ce rapport final.

Keywords: *wood drying; preservation; smoke; European Spruce*

INHALTSÜBERSICHT

1	AUSGANGSLAGE	5
2	ZIELSETZUNGEN	7
3	PROJEKTBETEILIGTE	8
4	VORGEHENSWEISE	8
5	ERGEBNISSE	10
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	26
7	BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	27
8	VERZEICHNISSE	28
	BERICHTE (AN DER AHB ABGELEGT)	30

INHALTSVERZEICHNIS

1	AUSGANGSLAGE	5
1.1	Neuere Forschungen und Hypothesen	5
1.2	Rauch: Zusammensetzung, Wirkung und Problematik.....	6
2	ZIELSETZUNGEN	7
3	PROJEKTBETEILIGTE	8
4	VORGEHENSWEISE	8
4.1	Behandlung	8
4.2	Material.....	9
4.3	Methoden.....	10
5	ERGEBNISSE	10
5.1	Trocknungsverhalten.....	10
5.2	Schwindverhalten	11
5.3	Hygroskopizität.....	12
5.4	Farbveränderung.....	13
5.5	Elektronische Geruchsanalyse.....	13
5.6	Weitere Versuche A: Trocknungseffekt von unterschiedlich langer Rauchbehandlung	14
5.7	Weitere Versuche B: Quell- und Schwindverhalten nach Behandlung mit Warmrauch	15
5.8	Weitere Versuche C: Dampfdiffusionseigenschaften nach Behandlung mit Warmrauch.....	17
5.9	Weitere Versuche D: Kapillare Wasseraufnahme nach Behandlung mit Warmrauch.....	19
5.10	Weitere Versuche E: Pilzresistenz nach Behandlung mit Warmrauch	21
5.11	Wirtschaftliche Aspekte der Rauchbehandlung	23
5.12	Mögliche Massnahmen zur Minderung der Emissionen	25
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	26
7	BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT	27
7.1	Umfang des Berichts	27
8	VERZEICHNISSE	28
8.1	Tabellenverzeichnis.....	28
8.2	Abbildungsverzeichnis.....	28
8.3	Diagrammverzeichnis.....	29
8.4	Literaturverzeichnis	29
	BERICHTE (AN DER AHB ABGELEGT)	30

1 AUSGANGSLAGE

Die technische Holz Trocknung, wie sie heute in ihren verschiedenen Modalitäten praktiziert wird, hat den Nachteil, dass sie sehr energieaufwändig ist, und dadurch einen wichtigen Kostenfaktor darstellt. Bei der Produktion von Nadel schnittholz kann zum Beispiel der in die technische Trocknung investierte Energieanteil zwischen 56% und 90% liegen, im Vergleich zur nötigen Gesamtenergiemenge vom Wald bis zum Fertigprodukt (Richter 1989).

Andererseits sind bestimmte Holzarten heute noch schwierig zu trocknen: dies ist beispielsweise bei der Eiche der Fall, wo qualitative Schäden manchmal nach dem Gang durch die Anlage erscheinen, in Form von Verkrümmungen, von Oberflächen- oder Innenrissen, von Verschalung, von Zellkollaps oder von Farbveränderungen.

Schliesslich wird die künstliche Holz Trocknung oft mit Schutzmassnahmen gegen Qualitätsvermindernde Schädlinge (Pilze / Insekten) kombiniert. Der Holzschutz erfolgt durch Anwendung von Bioziden, oberflächlich oder mittels einer Autoklave. Das so behandelte Holz gehört in der Regel am Ende des Verwendungszyklus in die Kategorie des Sondermülls, der in Spezialöfen verbrannt werden muss.

Aus diesen drei Aspekten ergibt sich die allgemeine Frage: - könnte eine Holzbehandlungstechnik entwickelt werden, welche folgende Charakteristiken aufweist

- durch technologische Einfachheit, Robustheit gekennzeichnet
- bei tiefer Energie funktionierend
- auch für empfindliche, delikate Holzarten geeignet
- eine Dimensionsstabilisierung mit sich bringend, und eventuell der Farbe
- Trocknung und Schutz im selben Behandlungsvorgang durchführend
- eine günstige ökologische und Energiebilanz präsentierend

Traditionell war die Räucherung eine weit verbreitete Methode zur Haltbarmachung und Aufbewahrung zahlreicher Lebensmittel (Leuchs, 1820, in Rauch, 1983); für Fisch, Fleischwaren und Käse wird sie heute noch häufig und auch industriell praktiziert. In Europa war auch die Holz Trocknung mittels Rauch früher eine bekannte und angewendete Technik. Vorreiter (1958) erwähnt diesbezüglich, dass sie eine günstige Methode darstellt und dass sie dem Holz einen gewissen Schutz gegen Pilzbefall gewährt. Der Vorteil gegenüber den Heissluft- und Dampftrocknungsanlagen besteht darin, dass es keine Energieübertragungsvorrichtung von der Wärmequelle (Holzfeuerung) auf die getrennt zirkulierende Konvektionsluft benötigt. Die Bedingungen der Rauchgastrocknung können durch Frischluft- und Dampfzufuhr reguliert werden.

Nach Bosshard (1975) verschwand die Rauchgastrocknung von Holz jedoch progressiv, ihrer Gefährlichkeit (Brand?) wegen und weil sie als umständlich und wenig effizient betrachtet wurde.

Die Grundidee des hier präsentierten Forschungsprojektes liegt im Aufgreifen einer umweltverträglichen, fast in Vergessenheit geratenen alten Technik und im Aktualisieren / Weiterentwickeln dieser Technik mit Hilfe der heutigen Methoden, Technologien und Materialkenntnissen für den europäischen Raum.

1.1 Neuere Forschungen und Hypothesen

Kürzlich haben sich japanische Forscher wieder dieser alten, auch im asiatischen Raum bekannten Technik gewidmet, indem sie Modifikationen einbrachten, die der heutige Technikstand ermöglicht. An der Spitze dieser letzten Entwicklungen im "smoke drying" stehen die Arbeiten von Ishiguri, Masubuchi, Maruyama et al., die am 7. Internationalen IUFRO-Symposium über die Holz Trocknung (Tsukuba, 2001) präsentiert wurden. Bestimmte Erfahrungen mit Bambus und Holz (Nomura, 1999) und die daraus abgeleiteten Interpretationen weisen interessante Aspekte auf, die genauer geprüft werden sollten:

- die Holz Trocknung mit Rauchgasen ermöglicht einen Ausgleich der internen Spannungen, die sonst zu Verkrümmungen und/oder zu Rissen führen
- die Produkte des thermischen Holzabbaus, die im Rauch enthalten sind, verbinden sich mit den Komponenten des Holzes oder des Bambus und erhöhen die dimensionale Stabilität des Materials
- der Widerstand des (als wenig dauerhaft bekannten) Bambus gegenüber Insekten- und Pilzbefall wird erhöht
- der Funktionsmodus der Rauchgastrocknung unterscheidet sich von der üblichen technischen Trocknung, insofern die Wärmeübertragung nicht nur durch Konvektion und Konduktion erfolgt, sondern auch durch Strahlung (jede Staubpartikel wirkt als "schwarzer Körper")
- die Luft, ein wenig effizientes Wärmeübertragungsmedium, wird durch eine Mischung von Gasen und Russpartikeln ersetzt, mit höherer thermischer Leitfähigkeit und höherer spezifischer Wärme
- die Strahlungskomponente übermittelt die elektromagnetische Energie dem Material direkt, ohne Beteiligung des Milieus. Der feste Kohlenstoff im Rauch (als Russpartikel) emittiert diese Energie im Infrarotbereich; diese thermische Energie wird durch die Holzmasse absorbiert und scheint eine Temperaturerhöhung der inneren Zonen zu bewirken

- die Rauchgastrockung erlaubt dadurch eine schonende Arbeit bei relativ tiefen Temperaturen, die aber in der Lage ist, die inneren Spannungen bleibend auszugleichen, offenbar dank einer beginnenden Plastifizierung des Lignins.

Schon 1951 hatten die Arbeiten von Jacquot und Keller-Vaillant gezeigt, dass Holzschutzgase, bei frischem Rundholz angewendet, eine erstaunliche Tiefenwirkung besitzen. Dies lässt annehmen, dass ein physikalisch-chemischer Effekt von Rauch auch innere Schichten des Trocken- und Behandlungsgutes erreichen kann.

Eine Untersuchung über den Pilzwiderstand von *Cryptomeria*-Holz nach einer Rauchbehandlung zeigte, dass die Abbaurate der Braunfäule nur ein Drittel beträgt im Vergleich mit unbehandeltem Holz (Yamamoto et al. 1998). Auch die tieferen Schichten (nach Entfernen der äusseren 3 mm) wiesen noch eine auf die Hälfte reduzierte Abbaurate auf. Dieser Effekt des Rauches geht allerdings nach einer intensiven Auswaschung verloren. Gegenüber Schimmelpilzen hatte die Rauchbehandlung keine Wirkung.

1.2 Rauch: Zusammensetzung, Wirkung und Problematik

Der Rauch, als Substanz, die hier speziell zur Anwendung kommt, kann wie folgt charakterisiert werden (im Allgemeinen, unabhängig von den holzartenspezifischen Unterschieden, vom Wassergehalt und vom Produktionsmodus): neben dem Kohlendioxid sind die Hauptbestandteile die Phenolverbindungen aus der Ligninpyrolyse, Alkohole und organische Säuren aus der Pyrolyse der Zellulose. Die konservierende Wirkung der Phenole beruht auf ihren antioxidativen und antibakteriellen Eigenschaften. Die anderen Rauchbestandteile (z.B. die Essigsäure) haben zudem eine fungistatische Wirkung. Auch zu erwähnen wegen ihrer toxischen, mutagenen oder cancerogenen Wirkung bei dauerndem Kontakt sind die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK, darunter Benzopyren) und das Formaldehyd. [Die Kennzeichnung des Formaldehyds als "krebserzeugend" wurde jedoch nicht von allen Fachinstanzen geteilt (Hompesch 1987, mit Hinweis auf den gemeinsamen Bericht vom 9.10.1984 des Deutschen Bundesgesundheitsamtes, des Bundesamtes für Arbeitsschutz und des Umweltamtes). Dieser Autor macht zudem auf natürliche Formen des Formaldehyds aufmerksam, z.B. aus Obst und Gemüse, wo beim Verzehr von einem Kilogramm bis zu 20 mg Formalehyd aufgenommen wird. Diese Menge entspricht dem 4- bis 5-Fachen der geschätzten täglichen Aufnahme am Arbeitsplatz (4 bis 5 mg), wenn dort der MAK-Wert von 1.2 mg erreicht ist. Im gleichen Sinn wird mit einer Tasse Kaffee je nach seiner Stärke ebenfalls 3 bis 7.5 mg Formaldehyd absorbiert]. In geräucherten Lebensmitteln wird diese zuletzt erwähnte Substanz auch in diesem Sinn bis zu einem bestimmten Grenzgehalt toleriert; Formaldehyd wird nämlich enzymatisch sehr schnell abgebaut, sodass bis zu 50 mg/kg in geräucherten Lebensmitteln als duldbar angesehen werden (Möhler, in Tóth, 1982).

In der Lebensmittelräucherung wird die Bildung eines oberflächlichen Überzugs ("sekundäre Haut") beschrieben, der durch Eiweisskondensation entsteht und auch zur Haltbarkeit beiträgt. Der konservierende Effekt der Phenolverbindungen wird durch eine Erhöhung der Zellmembranpermeabilität und damit verbundenem Verlust zellulärer Bestandteile erklärt (Wittkowski, 1985).

2 ZIELSETZUNGEN

Das Hauptziel dieses Projektes ist es, mit Hilfe einer Serie von Voruntersuchungen eine Basis zu liefern für weitergehende, systematische Forschungen auf einem sehr alten praktischen (heute jedoch meist verkannten) Anwendungsgebiet, welches in wissenschaftlicher Hinsicht sehr neue Fragestellungen aufwirft.

Nach der Literaturstudie zur Vorbereitung dieser Untersuchungen und auch dank mehreren Diskussionen innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft stellen wir fest, dass wir hier die ersten wären, welche die Potentiale dieser Methode ausserhalb Japan bearbeiten würden. Es handelt sich also darum, die Möglichkeiten der Holztrocknung und des Holzschutzes mit Hilfe von Rauch zu beschreiben und zu quantifizieren. Dies betrifft drei unserer Hauptholzarten: Fichte, Weisstanne und Eiche.

Die Vorversuche wurden zuerst mit Hilfe einer zur Verfügung gestellten Anlage einer Fleischverarbeitenden Firma durchgeführt (in diesem Schlussbericht, 1-ster Teil präsentiert), dann mit Hilfe einer an der HSB selbstgebauten Räucher-Kammer, sowie mit einem speziell eingerichteten traditionellen Räuchergerät und schliesslich mit Hilfe eines ausgeliehenen modernen, programmierbaren Räucherschrankes. Diese Vielfalt von Techniken und entsprechenden Erfahrungen dient als eventuelle erste Etappe von einem Forschungsprojekt, das eine dezentrale Förderung von z.B. Gebirgshölzern abzielt. Auf der technischen Ebene haben die Zielsetzungen dieser Voruntersuchungen eine doppelte Konfiguration, bezüglich 1) die Trocknungstechnologie mittels Rauch und 2) die Modifikationen der Holzeigenschaften, insbesondere im Zusammenhang mit ihrer Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit.

Technologie

Charakterisierung der Trocknung / Rauchbehandlung als Verfahren:

- Faktor "Temperatur": welche Trocknungseffekte sind mit "Kaltrauch" (25 °C) möglich, resp. mit "Warmrauch" (60 °C), zwei in der Fleischräucherung übliche Temperaturniveaus? [Effekte von höheren Temperaturen werden z.T. im Schlussbericht, 2-er Teil dargestellt, und werden insbesondere im Rahmen von ALCAWO untersucht, mit Hilfe von speziell konzipierten Anlagen]
- Faktor "Rauchtyp": bringt die Verwendung von Sägemehl, Schnitzel oder Massivholz (Scheiter) für die Produktion von Wärme und Rauch Unterschiede im Trocknungsablauf? [Im Schlussbericht 2-er Teil teilweise behandelt]
- Faktor "Wirtschaftlichkeit / Ökologie": welche energetische Vorteile sind im Vergleich mit der konventionellen Holztrocknung zu erwarten?

Modifikation der Holzeigenschaften

Charakterisierung der Einwirkungen auf das behandelte Material / Wie beeinflussen die verschiedenen Rauchbehandlungsvarianten (zunächst Kalt- und Warmrauch) die Kriterien:

- Hygroskopizität
- Schwinden / Quellen (Dimensionsstabilität)
- Gasdurchlässigkeit
- Flüssigkeitsdurchlässigkeit
- Auswaschbarkeit
- Farbe, unter Witterungseinfluss
- Pilzwiderstand (evtl. Effekt auf Insekten)?

Ferner soll die Eindringtiefe der Rauchkomponenten und der Einfluss der Rauchbehandlung auf die innere Holzkonsistenz (mittels Bruchbild) untersucht werden.

3 PROJEKTBETEILIGTE

Die erste Forschungsphase wurde mit Fichtenholz (*Picea abies* Karst.) durchgeführt, in Zusammenarbeit mit einer fleischverarbeitenden Firma (Bigler AG, Büren an der Aare BE), die uns Räucherungskammern zur Verfügung stellte. Ein Teil der Untersuchungen wurde unter Mitwirkung der Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB, Prof. E.Mougel, Epinal F) durchgeführt. Beteiligt an den Untersuchungen waren die Studenten V.Gayout, B.Cardinaux und J.Soulard. Mitarbeit am Konzept und Vermittlung der Kontakte: Dr. F.Pichelin. Bei den folgenden Arbeiten im Heizlabor AHB und gerätetechnischen Weiterentwicklungen: Hr. H.Bernard.

Involvierte Studierende im zweiten Teil der Untersuchungen: Herren Oliver Peter (Fachhochschule Lippe und Höxter), Karl Bollhalder, Nicola Vögtli, Olin Bartlomé, Matthias Oelhafen, Markus Jakob, Misha Bottinelli, Bruno Goetschy, Andreas Hofer, Philippe Volet, Simon Rutz und David Thommen.

4 VORGEHENSWEISE

4.1 Behandlung

Es wurden drei Behandlungsvarianten, in jeweils drei Stufen gewählt, wie in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Übersicht der Rauchtypen und Behandlungszeiten

Variante	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Kaltrauch (F), 26°C, 78% rF	1 Woche	2 Wochen	4 Wochen
Warmrauch (C), 55°C, 60% rF	1 x 9 Stunden	2 x 9 Stunden	4 x 9 Stunden
Referenz (T) Klimaraum, 23°C, 50% rF	1 Woche	2 Wochen	4 Wochen



Abbildung 1: Raucherzeugung für das Räuchern von Fleischprodukten bei der Firma Bigler AG



Abbildung 2: Fleischprodukte vor der Räucherung bei der Firma Bigler AG

Um die ganze Variationsbreite abzudecken wurden vier Holzvarianten untersucht (**A** steht für "aubier", **P** für "bois parfait", **L** für "large" und **E** für "étroit")

- Splintholz / breite Jahrringe (**AL**)
- Kernholz / breite Jahrringe (**PL**)
- Splintholz / schmale Jahrringe (**AE**)
- Kernholz / schmale Jahrringe (**PE**)

4.2 Material

Das Probenmaterial ist, den Untersuchungskriterien entsprechend, in 2 Formen konfiguriert (Tabelle 2):

Tabelle 2: Konfiguration des Probenmaterials

Probenform	Dimension [mm]	Anzahl	Untersuchungen
Prismen	60*60*30	180	Feuchte, Dichte, Schwindmass, Hygroskopizität, elektr. Geruchsanalyse, Dauerhaftigkeit
Bretter	100*50*10	90	Witterungsverhalten, Farbveränderung

Die Einheitlichkeit des Versuchsmaterials ist dokumentiert durch die Histogramme der Ausgangsfeuchten (

Abbildung 3) und der Darrdichten (

Abbildung 4).

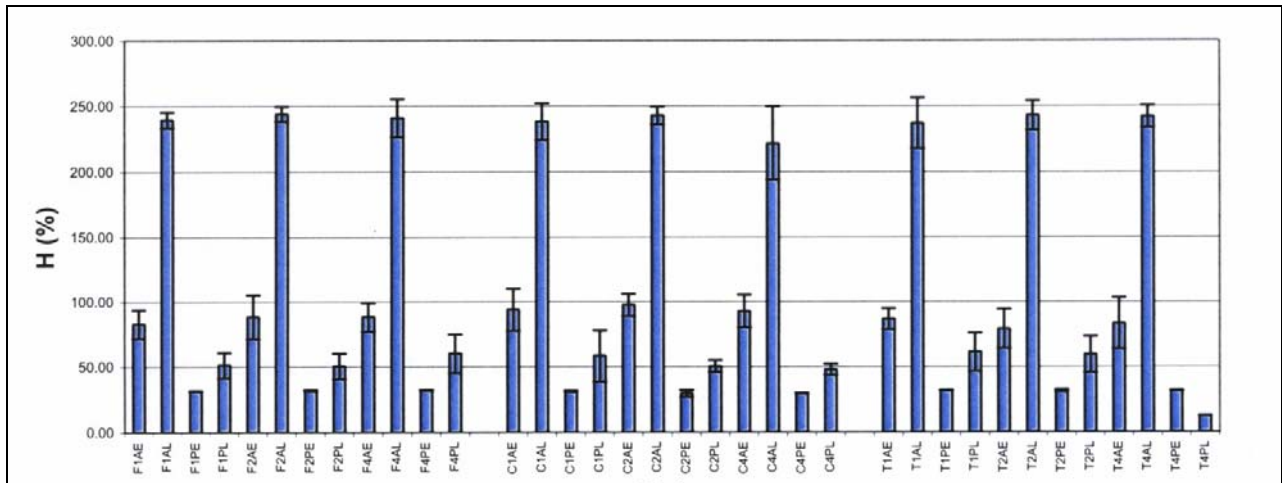


Abbildung 3: Ausgangsfeuchten der drei Versuchsserien (Mittelwerte mit Standard- Abweichungen). C1AL: Warmrauch, 1 x 9 Stunden, Splintholz, breite Jahrringe. Höchstwerte zeigen immer die breitringigen Splintholzproben, die tiefsten Werte stammen aus engringigen Kernholzproben.

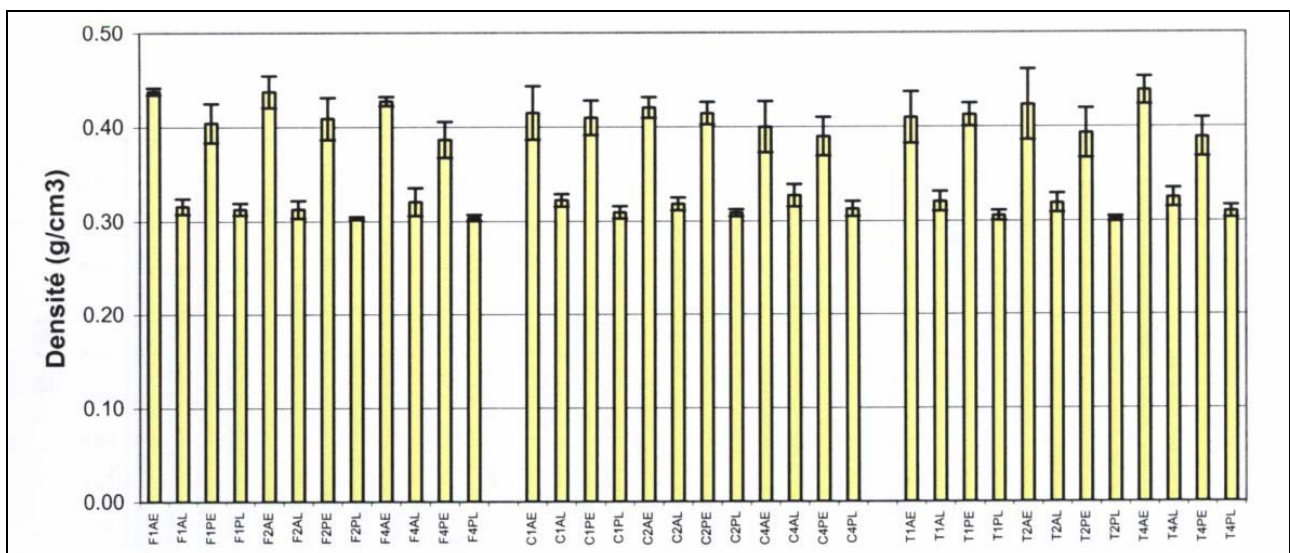


Abbildung 4: Darrdichten der drei Versuchsserien (Mittelwerte mit Standard- Abweichungen). F4PE: Kaltrauch, 4 Wochen, Kernholz, enge Jahrringe. Engringige Splint- und Kernholzproben besitzen eine Darrdichte um 0.40 g/cm^3 , breitringige um 0.30 g/cm^3 .

4.3 Methoden

Die Methoden zu den verschiedenen Testverfahren werden in den jeweiligen Teilberichten beschrieben (vgl. Bericht V. Gayout, resp. Rapport d'analyse n° 02149 im Anhang)

5 ERGEBNISSE

5.1 Trocknungsverhalten

Es werden hier zunächst zwei Ergebnisse dargestellt, die das Trocknungsverhalten nach den drei Varianten illustrieren. In der Abbildung 3 wird ersichtlich, dass die Warmrauchtrocknung (C) schon nach 9 Stunden die Proben auf ein tiefes Feuchteniveau bringt (um 16%), das erst nach 36 Stunden noch etwas weiter reduziert wird (auf ca. 13%). Auf einer anderen Zeitskala (1, 2 und 4 Wochen), hier bei vergleichbaren Arbeitstemperaturen aber unterschiedlichen Feuchten, wird eine schonendere Trocknung bei Kaltrauch beobachtet, im Vergleich zur offenen Trocknung im Labor.

Vielleicht als Zeichen eines stabilisierenden Effektes des Rauches bleibt der Feuchtebereich auch nach 36 Stunden (Warmrauch) deutlich oberhalb des theoretischen hygroskopischen Wertes (ca. 9%) für reine Luft bei gleicher Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Es bleibt abzuklären, ob der Rauch (der bis in das Innere der Proben riechbar ist) bei dieser Erhöhung der Gleichgewichtsfeuchte eine ähnliche Wirkung hat wie diejenige der Kernholzsubstanzen bei dunklen Arten.

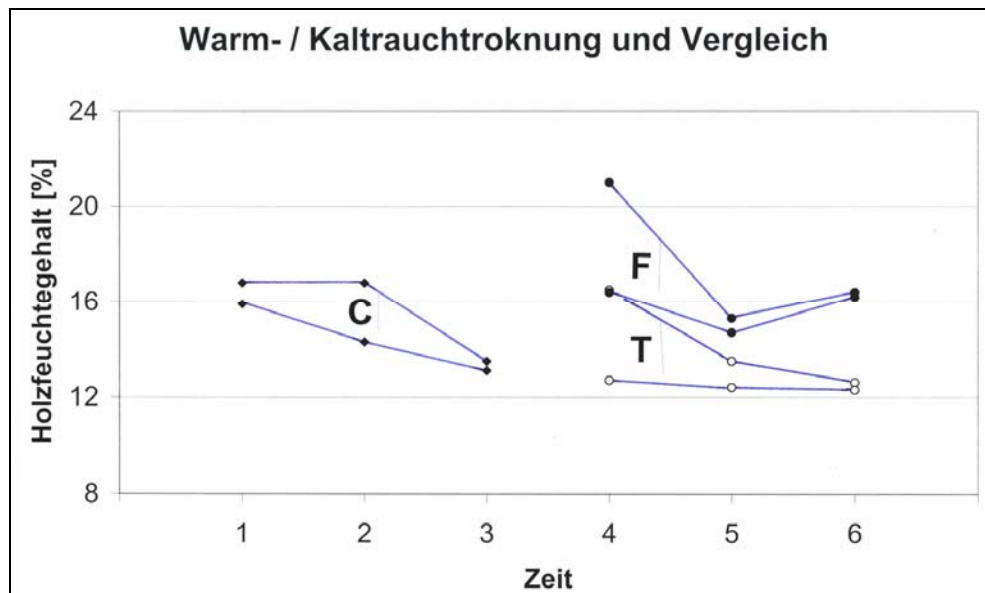


Abbildung 5: Verlauf des Feuchtegehaltes des Holzes bei Warmrauch- (C), Kaltrauch- (F) und Vergleichstrocknung (T). 1=9 Stunden / 2=18 Stunden / 3=36 Stunden / 4=1 Woche / 5=2 Wochen / 6=4 Wochen. Für jeden Zeitpunkt werden nur die jeweiligen 2 Extremmittelwerte dargestellt.

5.2 Schwindverhalten

Ein Effekt der Rauchbehandlung erscheint zudem bei der Untersuchung des Schwindverhaltens. Am Beispiel der Radialschwindung, berechnet anhand der Enddimensionen der Proben im darrtrockenen Zustand, kann gezeigt werden, dass das Ausgesetztsein an Rauch eine systematische Reduzierung des Schwindmasses mit sich bringt. Die Schwindung der geräucherten Proben, in Prozentwerten des entsprechenden Referenzmaterials, liegt systematisch tiefer, besonders für Warmrauch (Tabelle 3). Die grössten Effekte sind im Splintbereich zu beobachten, und allgemein bei breiten Jahrringen, sowohl im Splint wie im Kern. Bei der Tangentialschwindung liegen die Verhältnisse ähnlich, wenn schon weniger systematisch als bei der Radialschwindung (Tabelle 4). Daraus kann die Globalschwindung im Querschnitt berechnet werden (Tabelle 5). Die erzielten Werte sind relevant: um 10 bis zu 30% kann die trocknungsbedingte Dimensionsreduktion durch eine Rauchbehandlung verringert werden. Dies ist ein beachtenswertes Resultat, weil schon bei Kaltrauch sich abzeichnend. Diese Auswirkung auf das Schwindverhalten deutet an, dass der Rauch an sich eine messbare Modifikation der chemisch-physikalischen Eigenschaften des Holzes bewirkt. Interessant ist zudem, dass zwischen den Beandlungsdauern, sei es für Kaltrauch oder für Warmrauch, kein signifikanter Unterschied besteht, was auf die Schnelligkeit der Raucheinwirkung hinweist.

Tabelle 3: Radialschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklimala-Lagerung, von fasergesättigt bis darrtrocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.

	Kaltrauch (%)	Warmrauch (%)	Referenz (%)
Splint schmale Jahrr.	102.2	85.2	100
Splint breite Jahrr.	82.1	83.5	100
Kern schmale Jahrr.	98.2	95.6	100
Kern breite Jahrr.	91.2	92.6	100

Tabelle 4: Tangentialschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklima-Lagerung, von faser gesättigt bis darr trocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.

	Kaltrauch (%)	Warmrauch (%)	Referenz (%)
Splint schmale Jahrr.	95.7	82.8	100
Splint breite Jahrr.	92.6	90.2	100
Kern schmale Jahrr.	101.9	94.8	100
Kern breite Jahrr.	107.0	96.9	100

Tabelle 5: Berechnete flächenmässige Querschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklima-Lagerung, von faser gesättigt bis darr trocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.

	Kaltrauch (%)	Warmrauch (%)	Referenz (%)
Splint schmale Jahrr.	97.8	70.5	100
Splint breite Jahrr.	76.0	75.3	100
Kern schmale Jahrr.	100.1	90.6	100
Kern breite Jahrr.	97.6	89.7	100

5.3 Hygroskopizität

Die Prüfung der Hygroskopizität (Wasser-Sorptionsverhalten) bis zur Einstellung des Feuchtegleichgewichtes unter Atmosphären unterschiedlicher Feuchtigkeit (RH = 44.9 % / 71.7 % / 91.1 %) zeigt schon nach der ersten Behandlungsdauer für die Proben mit breiteren Jahrringen leicht tiefere relative Werte (zwischen ca. 96 % und 99 %) bei den 2 Rauchbehandlungsformen im Vergleich mit den breitringigen Referenzproben (Abbildung 7). Für die Proben mit schmalen Jahrringen sind die Verhältnisse etwas ausgeprägter, mit Relativwerten zwischen ca. 85 % und 101 %. Hier liegt ein weiterer Hinweis von Stabilisierungseffekt vor, nämlich in der Form eines Schutzes gegen spontane Feuchteaufnahme, was im Sinn einer relativ höheren Dauerhaftigkeit wirkt (die holzabbauenden Pilze brauchen nämlich für ihre Entwicklung feuchte Verhältnisse über längere Zeiten).

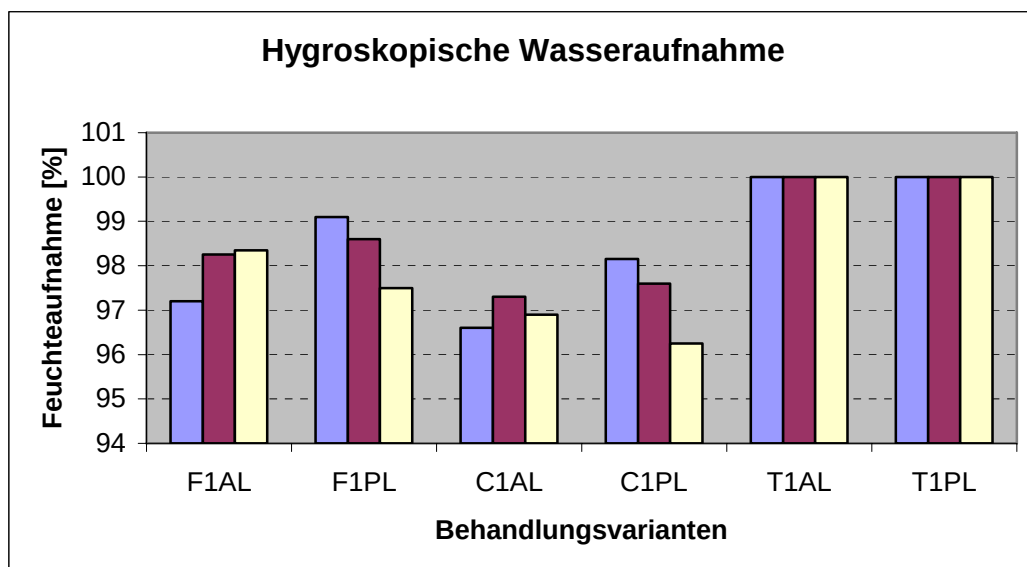


Abbildung 6 Hygroskopisches Verhalten der breitringigen Proben nach Kaltrauch- (F) und Warmrauchbehandlung (C) im Vergleich mit Normalklima-Lagerung (T), unter 3 verschiedenen Feuchtebedingungen.

5.4 Farbveränderung

Es zeigte sich beim künstlichen Witterungsversuch (beschleunigte Alterung), dass sich mit der Zeit der typische Grauton auch für geräuchertes Holz einsetzt (gleiche a- und b-Werte im I-a-b-System; Abbildung 7). Es war jedoch verbunden mit einer leicht tieferen Helligkeit und einem schwächeren Glanz für Kalt- und Warmrauchproben, auch nach einer 300-stündigen Behandlung mit künstlichem Sonnenlicht kombiniert mit Wasserwirkung.

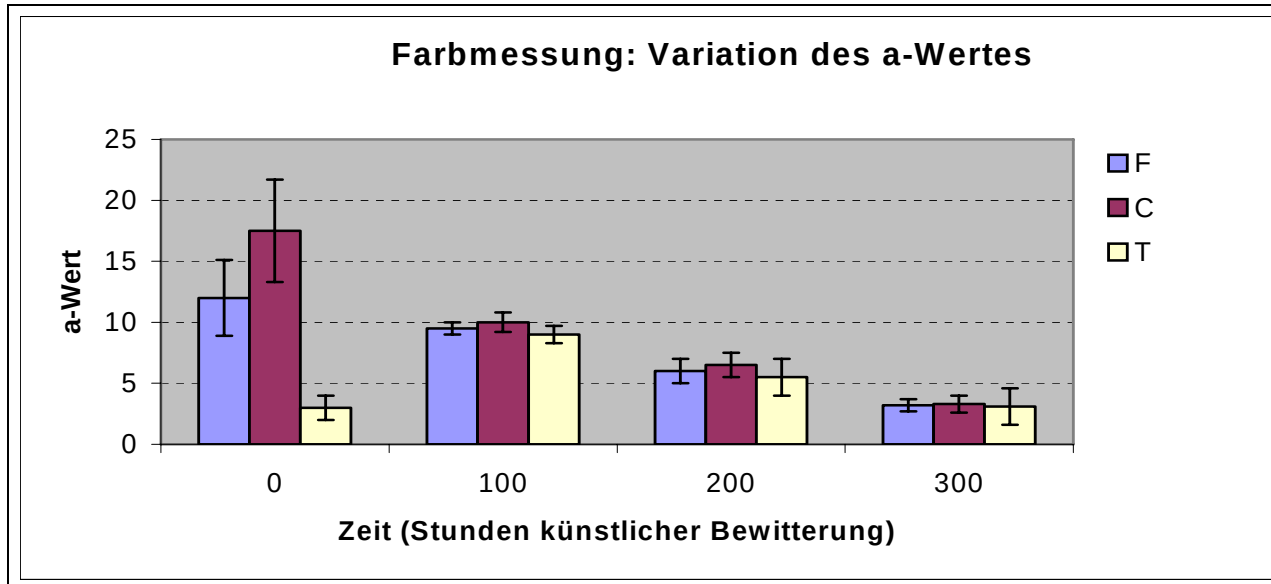


Abbildung 7 Variation des a-Wertes (grün/rot-Achse im I-a-b - Farbmess-System), für die Varianten Kaltrauch (F), Warmrauch (C) und Referenz (T), im Zusammenhang mit verschiedenen künstlichen Bewitterungszeiten. Die a-Werte befinden sich auf einer Gradienten: -100 (grün) bis +100 (rot). Die warmrauchbehandelte Probenreihe (C) ist ursprünglich die "röteste", gleicht sich aber im generellen Vergrauen den anderen an.

5.5 Elektronische Geruchsanalyse

Mit Hilfe einer Anlage basierend auf einer neuen Kombination von Gassensor-Arrays (Serien von gasempfindlichen Metallhalbleitern), verbunden mit statistischen neuronalen Netzen, welche als "elektronische Nase" für Untersuchungen im Lebensmittelsektor oder im Kosmetikbereich verwendet wird, konnten Teilprobenreihen aus dem Versuch olfaktorisch getestet werden. Das Ziel war es, primär zu prüfen, ob die angewendeten Rauchformen untereinander zu differenzieren sind, und sekundär, ob in tieferen Lagen der Probenkörper Rauchgaskomponenten noch feststellbar sind. Das Resultat war positiv, was das erste Ziel betrifft: Kalt- und Warmrauch lassen sich zusammen von einer "Flüssigrauchbehandlung" (besprühter Rauchextrakt) und von der Referenz unterscheiden. Zudem konnte festgestellt werden, dass die beiden gasförmigen Rauchvarianten deutlich in die Tiefe der Probenkörper eindringen (Abbildung 8), im Gegensatz zum Flüssigrauch, der an der Probenoberfläche limitiert bleibt. In diesem Sinn können wir den Bericht von Dr. Zesiger, Marin / NE, zitieren (siehe Beilage):

"Malgré une certaine inhomogénéité des échantillons, l'analyse d'espace de tête au moyen du système SMart Nose® permet de différencier les échantillons de bois témoins de ceux ayant été fumés. L'analyse ne permet pas de distinguer les procédés de fumage à froid ou à chaud. Étant donnée l'importante différence relevée entre ces échantillons et les témoins, nous pouvons estimer que le fumage a lieu en profondeur. Aucune distinction ne peut être faite entre les échantillons de surface et ceux prélevés à 5 et 10 mm de profondeur. Le procédé de fumage liquide, ne semble par contre agir qu'en surface."

Auch hier bestätigt sich altes Erfahrungswissen in innovativer Weise, nämlich, dass der gasförmige Rauch (oder bestimmte Komponenten davon) relativ rasch und auch bei niedrigen Behandlungstemperaturen ebenfalls in die Tiefe von Holzkörpern eindringen kann. Somit könnte man prinzipiell auch den Rauch zu den gasförmigen Holzschutzsubstanzen zählen, die nach Jacquot und Keller-Vaillant (1951) eine ausgeprägte Tiefenwirkung besitzen. Dies kann die Bedeutung einer noch darzustellenden Auswaschbarkeit etwas relativieren.

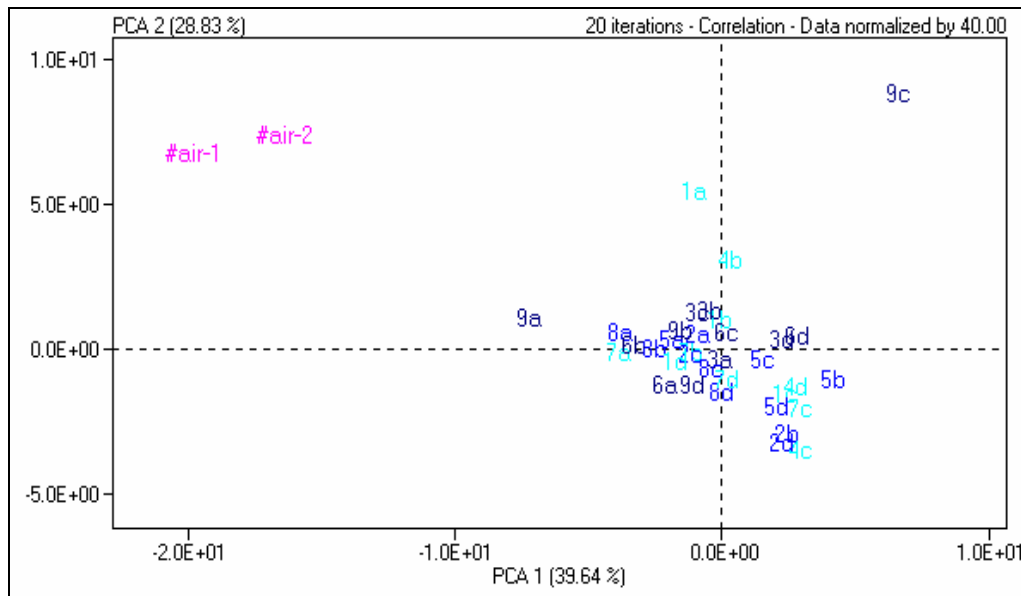


Abbildung 8 Kaltrauch: Hauptkomponentenanalyse (ACP) nach elektronischer Geruchsanalyse, anhand der Werte gruppiert nach den 3 verschiedenen Entnahmetiefen. Die Überlagerung der Positionen bedeutet, dass die tieferen Proben eine ähnliche Geruchsintensität aufweisen wie diejenigen direkt unter der Oberfläche (Diskriminierung: 60 %).

5.6 Weitere Versuche A: Trocknungseffekt von unterschiedlich langer Rauchbehandlung

Quelle: M. Bottinelli und B. Goetschy (2004): "Traitement de bardeaux à la fumée tempérée". HSB-Biel, auf Grund der Einrichtungen und Erfahrungen von O. Peter (2003): Forschungsbericht HSB-Biel.

Material: Grosse Schindeln ("bardeaux") von Fichte (*Picea abies*), Weisstanne (*Abies alba*) und Eiche (*Quercus sp.*), sowie von Edelkastanie (*Castanea sativa*) für einen Teil der Untersuchungen. Länge: 150 mm / Breite: 75 mm / Dicke: ca. 16 mm (handgespalten). Anzahl: 40 Stücke pro Art.

Behandlung:

Die Rauchquelle besteht aus einem konventionellen industriellen Räucherofen der Marke Fessmann, welcher mit standardisiertem, befeuchtetem Sägemehl funktioniert (Produktion: 6.3 m³ Rauch / min). Mit Hilfe eines zusätzlich eingerichteten Ventilators (ca. 14 m³/min) gelangt der Rauch in eine speziell gebaute experimentelle Räucherammer (1000 x 1250 x 700 mm). Der Gesamtdurchfluss der Räucherammer (ca. 20 m³) erlaubt die gezielte Tiefhaltung der Temperatur zwischen 30°C und 24°C, bei einer relativen Luftfeuchte von 54% - 68%, in Abhängigkeit von den Wetterverhältnissen.

Für die verschiedenen Untersuchungen wurden je 10 Schindeln pro Holzart 1 Woche, 2 Wochen und 3 Wochen rauchbehandelt, sowie als Referenz verwendet.

Um eine Trocknungssituation von frischem Holz zu simulieren, wurden die Schindeln während drei Tagen separat in destilliertes Wasser gelegt.

Ergebnisse:

Wegen der beschränkten Menge an Material haben die Ergebnisse lediglich einen indikativen Charakter. Für das Trocknungsverhalten sind die Verhältnisse jedoch sehr ausgeprägt und eindeutig (Abbildung 9). Schon nach einer Woche Rauchbehandlung erreichen die durchsättigten Proben der 3 Holzarten eine Feuchtigkeit um 11 %. Dieser Wert variiert nach der 2. und der 3. Woche Rauchbehandlung nur noch wenig (um 12%, resp. 8 - 9%), in Abhängigkeit von den variierenden Temperatur- und Luftfeuchteverhältnissen in der Kammer, sowie auch vom Luftdurchfluss.

Bei dieser Versuchsanordnung ist es nicht möglich zu bestimmen, nach welcher Zeit genau diese Holzfeuchteverhältnisse schon erreicht wurden. Zum Vergleich würde das Nadelholz in einer technischen Trocknungsanlage unter gleichen Feuchte- und Temperaturbedingungen eine Trocknungszeit von ca. 40 Stunden (knapp 2 Tage) verlangen, Laubholz (Eiche) ca. 120 Stunden (5 Tage). [Schätzung wurde anhand

des Holzhandbuches 1980 / Technische Trocknung erstellt]. In der später erfolgten Arbeit mit der gleichen Anlage (A. Hofer und P. Volet 2005) konnte bei dünneren Fichtenschindeln (5 - 8mm) schon nach 24 Stunden Rauchbehandlung (mit leicht tieferer Temperatur und höherer Feuchtigkeit) eine Trocknung vom wassergesättigten Zustand ausgehend auf die Holzfeuchte von 16% festgestellt werden.

Abgesehen von einer genauen Erfassung des Faktors "Zeit" kann hier somit bestätigt werden, dass sowohl Nadel- wie Laubholz im wassergesättigten Zustand mit Hilfe von lauwarmem Feuchtrauch effektiv getrocknet werden kann. Mit dieser experimentellen Versuchsanlage wurden deutlich tiefere Feuchten erreicht als mit Kaltrauch in der Fleischräuchererkammer (siehe Abbildung 5).

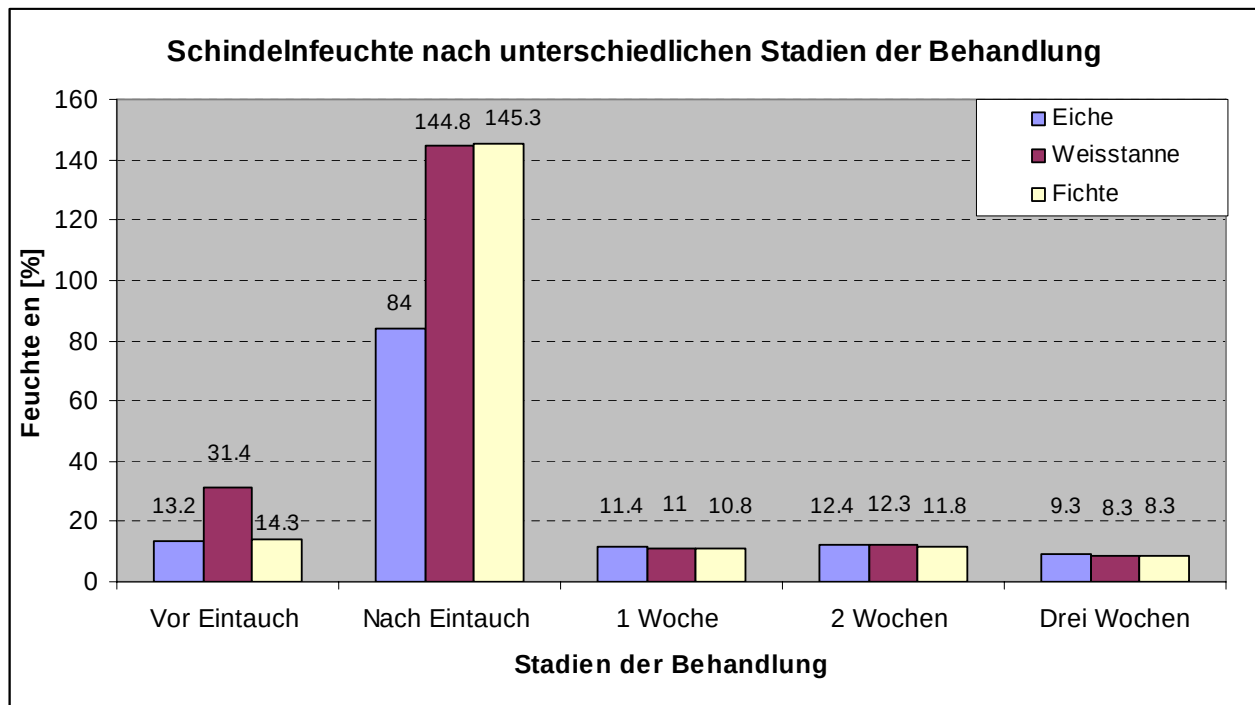


Abbildung 9 Schindelfeuchte nach unterschiedlicher Dauer der Rauchbehandlung.

5.7 Weitere Versuche B: Quell- und Schwindverhalten nach Behandlung mit Warmrauch

Quelle: O. Bartlomé und M. Oelhafen (2004): "Vergütung von Fichtenschindeln mittels Rauch". HSB-Biel.

Material: Maschinengespaltene kleine Schindeln von Fichte (*Picea abies*), mit allgemein feijnähriger Struktur (Rifholz). Breite: 60 mm / Dicke: 3 - 4 mm. Anzahl: 30 Stücke pro Behandlungsvariante (15 sehr feinringig < 1mm / Jahrring / 15 weniger feinringig > 1mm / Jahrring).

Behandlung:

In dieser Arbeit wurde eine speziell zu diesem Zweck leihweise eingerichtete moderne, programmierbare industrielle Räuchererkammer verwendet (Marke Fessmann, Typ Turbo 1800 RT).

Zuerst wurde 5 Stunden bei 25°C geräuchert und dann im 5-Stundenrhythmus die Temperatur stufenweise um 6°C bis auf 75°C erhöht und dort 6 Stunden gehalten. Am Ende des Räucherprogramms wurde die Temperatur für 2 Stunden auf 99°C erhöht, um das Räuchergut möglichst zu fixieren (Gesamtdauer: 48 h). Für jede Stufe dieser Behandlung wurde die relative Luftfeuchtigkeit auf den maximal möglichen Wert von 99% programmiert, um das Holz unter schonende Bedingungen zu behalten.

Die progressive Rauchbehandlung erfolgte nach 6 Vorbehandlungs-Varianten: 1.) R = mit Schindeln im Normklima (23°C / 50% rel. Luftfeuchte) konditioniert, 2.) RStg = im Normklima konditioniert und die Stirnseite mit flüssigem Rauchextrakt getränkt, 3) RGes = wassergesättigt, durch 16-stündiges Eintauchen, 4) RGesKa = wie RGes, und vor der Rauchbehandlung auf 16°C gekühlt, 5.) RGesStg = wie RGes, mit flüssigrauchbehandelter Stirnseite, und 6.) RGesKaStg = wie RGesStg, zusätzlich vor der Rauchbehandlung auf 16°C gekühlt. Die Referenzproben wurden lediglich im Normklima vorgelagert.

Eine Teiluntersuchung dieser Gruppe befasste sich mit der Dimensionsänderung (Quellung / Schwindung) zwischen 5 verschiedenen Feuchtezuständen, um den formstabilisierenden Effekt der Warmrauchbehandlung zu testen. Es sind dies: 1) $u = 10\%$ (konditioniert im Labor), 2) $u = 32\%$ (wassergesättigt), 3) $u = 9\%$ (Klimaschrank 50°C / 65% rel. Luftfeuchte), 4) $u = 4\%$ (Klimaschrank 50°C / 25% rel. Luftfeuchte), 5) $u = 0\%$ (darrtrocken).

Ergebnisse:

Im Vergleich mit den Referenzproben zeigten die geräucherten Varianten bei allen Stufen der Feuchteänderung eine schwächere Dimensionsänderung (der Breite, gemessen an jeweils 2 Stellen jeder Probe). Die globalen Verhältnisse werden in der Abbildung 10 dargestellt, mit der maximalen Dimensionsänderung zwischen Fasersättigung ($u = 32\%$) und darrtrockener Zustand ($u = 0\%$). Es kann hier festgestellt werden, dass der grösste stabilisierende Effekt bei der Räucherung normaler Proben (nicht wassergesättigt) vorliegt, ohne und mit Stirnholztränkung (R und RGes). Zudem ist interessant, dass bei den meisten Räucherungsvarianten das leicht breitringigere Holz noch stärker dimensionsstabilisiert wird als dasjenige mit mittleren Jahrringbreiten unter 1 mm . Für die R-Proben liegt somit für schmale Jahrringe das maximale Schwindmass bei 58% desjenigen von unbehandeltem Holz, und noch tiefer bei 41% für breitere Jahrringe. Dies ist ein Hinweis, dass die Rauchaufnahme im zweiten Fall intensiver geschieht. Dieser Befund an dünnen Proben stimmt mit demjenigen des Kapitels 5.1 (Tabellen 3, 4, 5) vollständig überein.

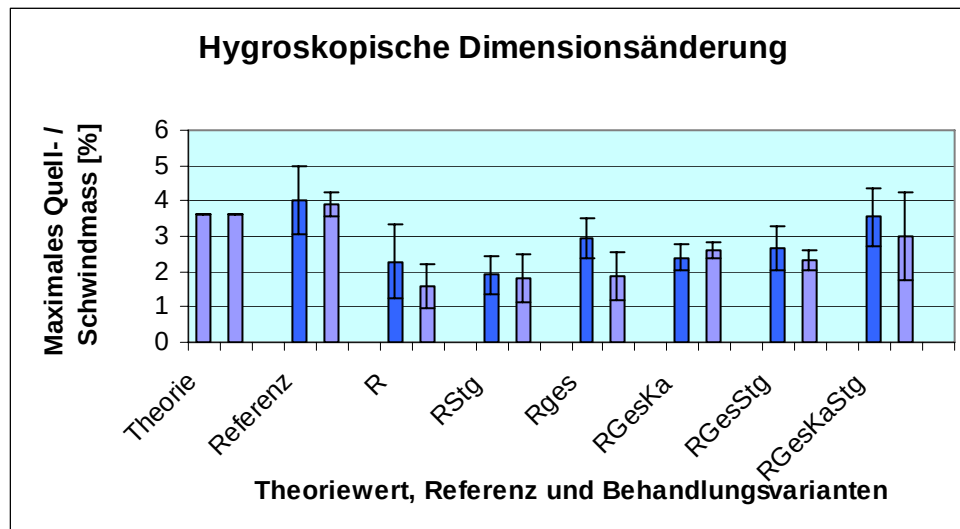


Abbildung 10 Dimensionsänderung von Fichten-Schindeln zwischen Fasersättigung und darrtrockenem Zustand, nach unterschiedlichen Modalitäten der Rauchbehandlung, verglichen mit Referenz (ohne Behandlung) und Literaturwert (Theorie). Mittelwerte mit Standardabweichung. Dunkel: feinere Jahrringe; hell: breitere Jahrringe. R = Warmrauch / RStg = Warmrauch, Stirnholz mit flüssigem Rauchextrakt getränkt / Rges = Warmrauch, nach Wassersättigung durch Eintauchen / RgesKa = wie Rges, kalt gelagert vor Räucherung / RgesStg = wie Rges, Stirnholz mit flüssigem Rauchextrakt getränkt / RgesKaStg = dito, zusätzlich kalt gelagert vor Räucherung.

Ein anderer Effekt der Räucherung von dünnen Proben bei hohen Temperaturen zeigt sich bei der Gleichgewichtsfeuchte unter Klimakammerbedingungen bei 50°C , und 25% , resp. 65% relative Luftfeuchte, welche ebenfalls signifikant tiefer liegt als bei unbehandelten Schindeln (siehe Tabelle 6, gemittelt für beide Jahrringtypen). Auch dies steht im Einklang mit der Beobachtung an grösseren Prismen (Abbildung 6).

Tabelle 6 Gleichgewichtsfeuchten (Ausgleichsfeuchten) [in %] von Fichtenschindeln bei Temperatur 50°C, unter zwei verschiedenen relativen Luftfeuchten (25% / 65%). Vergleich von geräucherten Proben mit Referenzproben (unbehandelt) und mit den Literaturwerten.

	Rel. Luftfeuchte 25%	Rel. Luftfeuchte 65%
Literatur	4.4	10.4
Referenz (ohne Behandlung)	4.34	9.02
Geräuchert	3.92 +/- 0.28	8.49 +/- 0.27
Geräuchert in % der Referenz	90.3 %	94.1 %

5.8 Weitere Versuche C: Dampfdiffusionseigenschaften nach Behandlung mit Warmrauch

Quelle: M. Jakob (2004): "Unkonventionelle Methoden der Oberflächenbehandlung von Holz". Diplomarbeit HSB-Biel (im Rahmen eines Praktikums an der ETH-Zürich).

Material: Kreisrunde Proben aus Fichtenholz (*Picea abies*), mit Durchmesser 140 mm und Dicke 19 mm. Anzahl Proben: 8 pro Behandlungsart (Warmrauchbehandlung und Referenz, neben weiteren Holzschutzbehandlungen).

Behandlung:

Auch in dieser Arbeit wurde die moderne industrielle Räucherammer Marke Fessmann, Typ Turbo 1800 RT für die Räucherung der Holzproben eingesetzt.

Das sägefrische Holz wurde zunächst unter Vakuum während 3 Stunden mit Wasser getränkt (zur Schaffung einer einheitlichen hohen Feuchtigkeit), um dann in einem Wechselzyklus von 12 min Räucherung - 20 min Trocknung bei konstanter Temperatur von 60°C während 43 Stunden behandelt zu werden.

Die Versuchsscheiben wurden bei gleich bleibender Temperatur zwei Varianten von Wasserdampf-Partialdruckdifferenz ausgesetzt (Gradiente 0% - 65% relative Luftfeuchte, resp. Gradiente 100% - 65% relative Luftfeuchte). Dem Versuchsaufbau entsprechend (siehe Abbildung 11) und nach den spezifischen Richtlinien der Norm DIN 52615 wurden die Kriterien Wasserdampf-Diffusionsstrom, Wasserdampf-Diffusionsstromdichte, Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl und die wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke bestimmt.

Ergebnisse:

Die erfassten Messargumente für das "Trockenverfahren" (0% - 65% rel. Luftfeuchte) sind in der Tabelle 7 wiedergegeben. Hervorgehoben wurde der Wasserdampf-Durchlasswiderstand μ : für die unbehandelten Proben (Referenz) ist er ca. 40-mal grösser als einer gleich dicken Luftschicht gleicher Temperatur. Anders ausgedrückt, müsste eine ruhende Luftschicht eine Dicke von ca. 0.77 m aufweisen, damit sie den gleichen Wasserdampf-Durchlasswiderstand wie die unbehandelte Referenzproben erreicht. Für die Warmrauchbehandelten Proben liegen die Werte sehr nah an denen der Referenzproben, mit einem Faktor $\mu = \text{ca. } 43$, was einer äquivalenten Luftschicht von ca. 82 cm entspricht. Deutlich höher ist vergleichsweise zum Beispiel der Wasserdampf-Diffusionswiderstand von thermisch behandeltem Holz ("Thermoholz"), mit $\mu = \text{ca. } 57$, was einer Luftschichtdicke von 107 cm gleichkommt.

Beim "Nassverfahren" (100% - 65% rel. Luftfeuchte) zeigen die Messargumente (siehe Tabelle 8), dass für die unbehandelte Referenzprobe der Wasserdampf-Diffusionswiderstand mit dem Faktor $\mu = 20$ noch die Hälfte beträgt, was einer Luftschichtdicke von ca. 38 cm entspricht. Auch hier sind die Werte der Warmrauchproben kaum höher, mit $\mu = 21$, was einer Luftschicht von 40 cm gleichkommt. Analog zum Trockenverfahren bietet hier Thermoholz einen deutlich höheren Widerstand, mit $\mu = \text{ca. } 30$ (äquivalente Luftschichtdicke von ca. 57 cm).

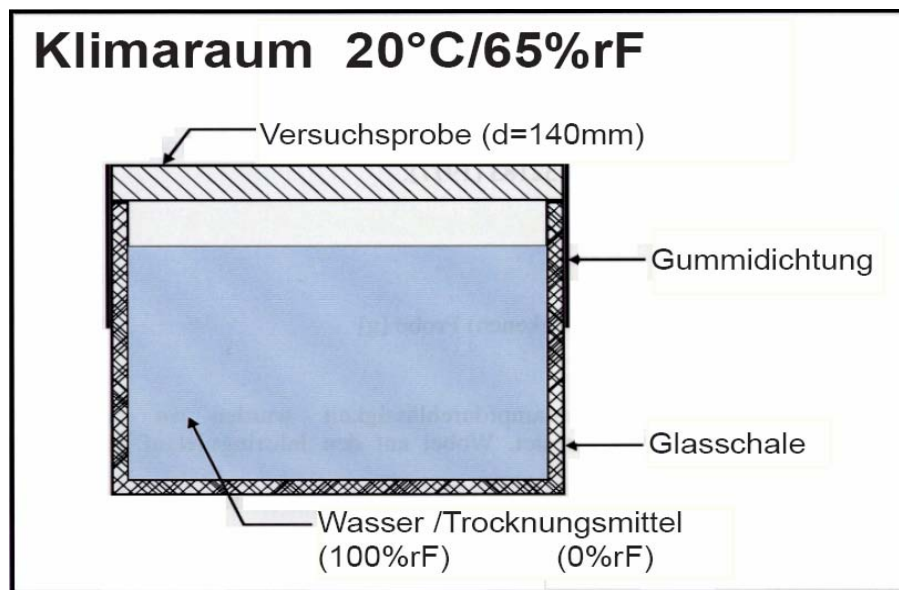


Abbildung 11 Versuchsanordnung für die Dampfdurchlässigkeitsbestimmung, mit einem Gefäß unter Labor- Normalbedingungen (20°C / 65% rel. Luftfeuchte) platziert, entweder Wasser oder ein Trocknungsmittel (Silikagel) enthaltend.

Tabelle 7 Gemessene und berechnete Mittelwerte der unbehandelten und mit Warmrauch, resp. Hochtemperatur behandelten Proben zwischen 0% und 65% rel. Luftfeuchte

Begriffe	Unbehandelt	Warmrauch	Thermoholz
Durchmesser der Probe quer d_q [m]	0.141	0.142	0.141
Durchmesser der Probe längs d_l [m]	0.140	0.140	0.140
Mittlere Probendicke s [m]	0.019	0.019	0.019
Mittlere Luftschichtdicke unterhalb der Probe s_L [m]	0.030	0.030	0.030
Massendifferenz zwischen 2 Wägungen $m_2 - m_1$ [g]	-2.655	-2.668	-2.240
Zeitspanne zwischen 2 Wägungen $t_2 - t_1$ [h]	119.670	125.710	138.080
Prüffläche der Probe A [m ²]	0.016	0.016	0.016
Wasserdampf-Diffusionsstromdichte WDD [g/ m ² xd]	34.402	32.860	25.178
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand μ	40.560	42.754	56.790
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D [m]	0.774	0.816	1.070
Wassergehalt vor der Messung u_v [%]	12.889	12.653	9.309
Wassergehalt nach der Messung u_n [%]	10.497	10.527	7.382
Rohdichte r_n [g/ cm ³]	0.424	0.418	0.436
Rel. Luftfeuchte oberhalb der Probe j_1 [%]	65.000	65.000	65.000
Rel. Luftfeuchte unterhalb der Probe j_2 [%]	0.000	0.000	0.000
Wasserdampf-Partialdruck oberhalb der Probe p_1 [Pa]	1519.580	1519.580	1519.580
Wasserdampf-Partialdruck unterhalb der Probe p_2 [Pa]	0.000	0.000	0.000

Tabelle 8 Gemessene und berechnete Mittelwerte der unbehandelten und mit Warmrauch, resp. Hochtemperatur behandelten Proben zwischen 100% und 65% rel. Luftfeuchte

Begriffe	Unbehandelt	Warmrauch	Thermoholz
Durchmesser der Probe quer d_q [m]	0.141	0.141	0.141
Durchmesser der Probe längs d_l [m]	0.140	0.140	0.140
Mittlere Probendicke s [m]	0.019	0.019	0.019
Mittlere Luftschichtdicke unterhalb der Probe S_L [m]	0.015	0.015	0.015
Massendifferenz zwischen 2 Wägungen $m_2 - m_1$ [g]	7.023	7.283	5.903
Zeitspanne zwischen 2 Wägungen $t_2 - t_1$ [h]	290.420	312.080	359.580
Prüffläche der Probe A [m ²]	0.016	0.016	0.016
Wasserdampf-Diffusionsstromdichte WDD [g/ m ² xd]	37.524	35.936	25.488
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand μ	20.050	20.863	30.401
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D [m]	0.383	0.399	0.573
Wassergehalt vor der Messung u_v [%]	13.008	12.774	9.017
Wassergehalt nach der Messung u_n [%]	19.561	19.441	14.288
Rohdichte r_n [g/ cm ³]	0.409	0.413	0.418
Rel. Luftfeuchte oberhalb der Probe j_1 [%]	65.000	65.000	65.000
Rel. Luftfeuchte unterhalb der Probe j_2 [%]	100.000	100.000	100.000
Wasserdampf-Partialdruck oberhalb der Probe p_1 [Pa]	1519.580	1519.580	1519.580
Wasserdampf-Partialdruck unterhalb der Probe p_2 [Pa]	2337.820	2337.820	2337.820

Diese Ähnlichkeit der Wasserdampf-Diffusionswerte der geräucherten Proben im Vergleich zu den unbehandelten ist zunächst erstaunlich, ist doch eine deutlich tiefere Gleichgewichtsfeuchte festgestellt worden (Abbildung 6 und Tabelle 6). Das Phänomen interpretieren wir demnach als Modifikation im Sinn einer offenenporigen schwachen Hydrophobierung.

5.9 Weitere Versuche D: Kapillare Wasseraufnahme nach Behandlung mit Warmrauch

Quelle: M. Jakob (2004): "Unkonventionelle Methoden der Oberflächenbehandlung von Holz". Diplomarbeit HSB-Biel (im Rahmen eines Praktikums an der ETH-Zürich).

Material: Würfel aus Fichtenholz (*Picea abies*), mit Kantenlängen von 50 x 50 x 50 mm. Die Proben wurden mit oberflächenparallelen Jahrringen hergestellt (Riftholz), um eine differenzierte Untersuchung in den drei Strukturrichtungen zu ermöglichen. Anzahl Proben: 18 pro Behandlungsart (je 6 axial, radial und tangential).

Behandlung:

Wie bei der Untersuchung der Wasserdampf-Diffusion wurde für die Behandlung der Holzwürfel die Räucherkeramik Marke Fessmann, Typ Turbo 1800 RT, eingesetzt. Auch hier wurde das sägefrische Holz zunächst unter Vakuum während 3 Stunden mit Wasser getränkt (zur Schaffung einer einheitlichen hohen Feuchtigkeit), um dann in einem Wechselzyklus von 12 min Räucherung - 20 min Trocknung bei konstanter Temperatur von 60°C während 43 Stunden behandelt zu werden.

Das Verfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten richtet sich nach der Norm DIN EN ISO 15148. Das Ziel ist ein quantitatives Erfassen der kapillaren Feuchtigkeitsbewegungen in einem Bauteil, welche massgebend sind für die Fäuleanfälligkeit. Der Wasseraufnahmekoeffizient wird definiert als die von einem Probekörper je Flächeneinheit und Wurzel aus der Zeit aufgenommene Wassermenge. Bei diesem Test werden die Probenwürfel bei Normalbedingungen (20°C / 65% rel. Luftfeuchte) nur bis auf eine Tiefe von 5 mm ins Wasser eingelegt. Seitlich ist der Würfel mit einem wasserundurchlässigen Acrylfarben-Anstrich versehen, damit die Feuchtebewegung nur nach einer Richtung erfolgt. Bei definierten Zeitabständen wird das Gewicht, und dadurch die Kapillare Wasseraufnahme gemessen.

Ergebnisse:

Analog zur Wasserdampf-Diffusion ist auch beim Wasseraufnahmekoeffizienten der Mittelwert für Warmrauchproben in allen drei Strukturrichtungen praktisch identisch mit demjenigen für die Referenzproben (Tabelle 9 und Abbildung 12). Die vergleichbare Grössenordnung der Standardabweichungen unterstreicht noch diese Gleichwertigkeit.

Dieses Resultat lässt somit ebenfalls nicht auf einen Einfluss der Holzräucherung (zumindest bei einer Temperatur von 60°C) auf die kapillare Wasseraufnahme schliessen. Auch hier liegt eine Diskrepanz zum klar unterschiedlichen Dimensionsverhalten und zur unterschiedlichen Hygroskopizität vor.

Tabelle 9 Kapillare Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Warmrauch behandelten Proben, nach drei Probenrichtungen (Mittelwerte +/- Standardabweichung, in $\text{Kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}0.5$).

Richtung	Unbehandelt (Mittelwert +/- Stabw)	Warmrauch (Mittelwert +/- Stabw)
Axial	0.0189 +/- 0.0022	0.0193 +/- 0.0034
Radial	0.0018 +/- 0.0002	0.0019 +/- 0.0003
Tangential	0.0019 +/- 0.0003	0.0018 +/- 0.0003

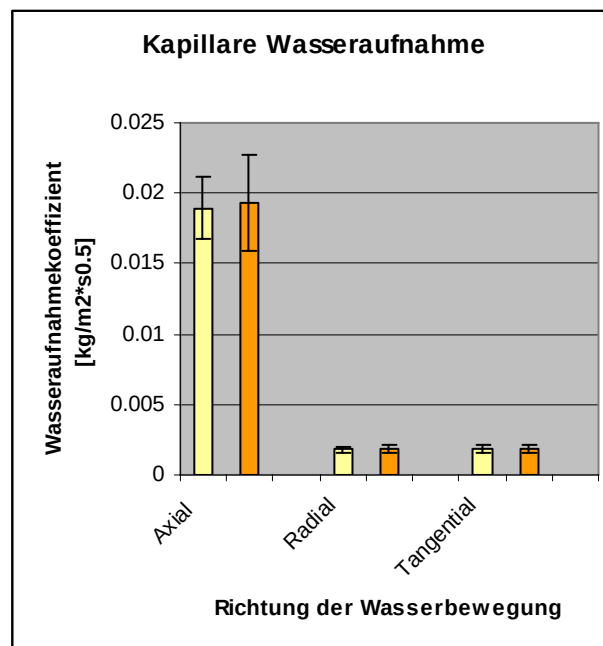


Abbildung 12 Kapillare Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Warmrauch behandelten Proben, nach drei Probenrichtungen (Mittelwerte +/- Standardabweichung, in $\text{Kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}0.5$). Hell: unbehandelt (Referenz) / dunkel: mit Warmrauch behandelt.

5.10 Weitere Versuche E: Pilzresistenz nach Behandlung mit Warmrauch

Quelle: M. Jakob (2004): "Unkonventionelle Methoden der Oberflächenbehandlung von Holz". Diplomarbeit HSB-Biel (im Rahmen eines Praktikums an der ETH-Zürich).

Material: Prismen aus Fichtenholz (*Picea abies*), mit Abmessungen von 25 x 15 x 50 mm (r x t x l). Pro Pilzart und Behandlungsvariante wurden jeweils je 8 behandelte und unbehandelte Prüfkörper bereitgestellt. [Hier werden speziell die Ergebnisse für die Warmrauchvariante dargestellt].

Behandlung:

Warmrauchbehandlung: Wie für die Dampfdurchlässigkeits- und Wasseraufnahmeprobe (Kapitel 5.8 und 5.9).

Die Testmethodik für die Untersuchung der Pilzresistenz richtet sich nach der Norm DIN EN 113. Das klimatisierte und sterilisierte Holzmaterial wird in Kolleschalen auf einem Nährmedium der Pilzeinwirkung ausgesetzt, jeweils behandelte Prüfkörper zusammen mit unbehandelten. Zudem werden parallel Virulenztests durchgeführt, sowie Korrekturwerte bestimmt, mit Hilfe von nicht pilzinfierten Prüfkörpern. Die Versuchsgefässe blieben für 16 Wochen in einem speziell klimatisierten Brutschrank (22°C / 70% rel. Luftfeuchte). Die Warmrauchproben wurden dem Abbau von folgenden Pilzarten ausgesetzt:

- *Coniophora puteana* Brauner Kellerschwamm (Braunfäule)
- *Gloeophyllum trabeum* Balkenblättling (Braunfäule)
- *Fomitopsis pinicola* Rotrandiger Braunschwamm (Braunfäule).

Die Abbaurate wird mittels Massenverlust im Vergleich zur Ausgangsprobe bestimmt. Zusätzlich wird der Bewachungsgrad durch das Pilzmyzel visuell eingestuft. Die Norm definiert zudem, unter welchen Bedingungen eine Behandlung als gesichert pilzwirksam deklariert werden kann.

Eine Testserie wurde mit vollständig imprägnierten / oberflächenbehandelten Proben durchgeführt (unbewittert), eine weitere Testserie nach künstlicher Bewitterung, was eine teilweise oder vollständige Auswaschung der Behandlungssubstanzen mit sich bringt. Die Bewitterungsanlage arbeitete in ¼ h Regen- und ½ h UV-Licht-Zyklen, bei einer Temperatur von 55°C. Mit 3 Wochen Behandlung wurden ca. 6 Monate natürliche Bewitterung simuliert.

Ergebnisse:

Die Behandlung mit Warmrauch verleiht den intakten Prüfkörpern (nicht bewittert) einen deutlichen Schutz gegenüber dem braunen Kellerschwamm (*Coniophora puteana*), unter welchem der mittlere Massenverlust von 2,2% nur 9% im Vergleich mit unbehandelten Proben darstellt (Tabelle 10, Abbildung 13). Nach den Normen wird dieser Effekt jedoch als nicht genügend betrachtet, weil sich unter den rauchbehandelten Proben eine mit einem Gewichtsverlust von knapp über dem Grenzwert von 5% befand. Beim Abbauver such mit dem weniger virulenten Balkenblättling (*Gloeophyllum trabeum*) ist der Massenverlust von unbewitterten Warmrauch-Proben mit 1.4% noch tiefer, und erfüllt zudem alle Gültigkeitskriterien der Normen. Die tiefere Virulenz erklärt den ebenfalls schwachen Massenverlust der unbehandelten Proben und das berechnete Verhältnis von 48%. Gegen den extrem aggressiven Rotrandigen Braunschwamm (*Fomitopsis pinicola*) erwies sich die Rauchbehandlung bei unbewitterten Proben als nur sehr schwach wirksam (mit nur 78% des Abbaus im Vergleich mit Proben ohne Schutzbehandlung).

Die Pilzresistenz der bewitterten Proben ist bei allen drei Holzzerstörern massiv reduziert (Tabelle 10, Abbildung 14). Die Auswaschung der Rauchsubstanzen hinterlässt Proben, die sich bei *Coniophora* und bei *Fomitopsis* kaum von den unbehandelten Referenzproben unterscheiden. Lediglich bei *Gloeophyllum* ist der Massenverlust mit vergleichsweise 75% leicht schwächer als derjenige der Referenzproben. Dieser partielle, abgeschwächte Effekt der Rauchbehandlung ist jedoch mit den erhaltenen Kenngrössen (Mittelwert / Standardabweichung) weder statistisch signifikant, noch nach den Normanforderungen relevant.

Tabelle 10 Mittlerer Massenverlust, Standardabweichung und Befund mit Warmrauch behandelten Proben und unbehandelten Proben. Der angegebene Faktor gibt den Massenverlust nach Warmrauchbehandlung verglichen mit „Unbehandelt“ in % wieder. Gelb schattiert: nach allen Normkriterien dokumentierte schützende Wirksamkeit.

	Prüfpilz	Unbehandlet Massenverlust [%] $\bar{x} \pm s$	Warmrauch Massenverlust [%] $\bar{x} \pm s$	Faktor
Unbewittert	Coniophora puteana	23.47 $\pm$ 12.59	2.16 $\pm$ 4.05	9%
	Gleophyllum trabeum	2.90 $\pm$ 0.67	1.43 $\pm$ 1.41	48%
	Fomitopsis pinicola	57.76 $\pm$ 3.22	45.12 $\pm$ 6.76	78%
Bewittert	Coniophora puteana	25.69 $\pm$ 9.62	27.34 $\pm$ 1.76	106%
	Gleophyllum trabeum	5.20 $\pm$ 1.35	3.86 $\pm$ 1.09	75%
	Fomitopsis pinicola	50.15 $\pm$ 10.78	53.18 $\pm$ 2.47	106%

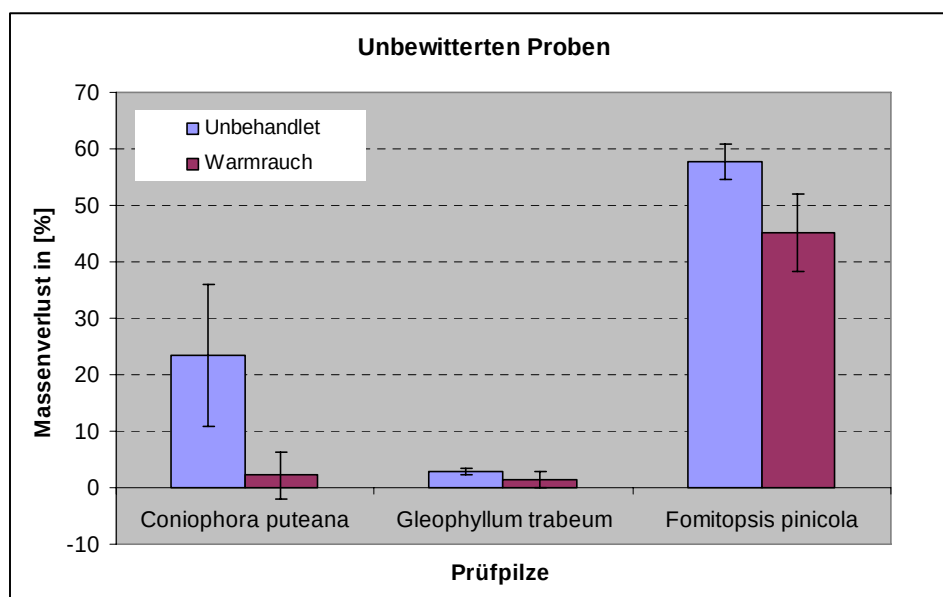


Abbildung 13 Holz-Abbau durch drei Pilzarten, nach Warmrauchbehandlung verglichen mit Referenz (ohne Behandlung), unbewittert.

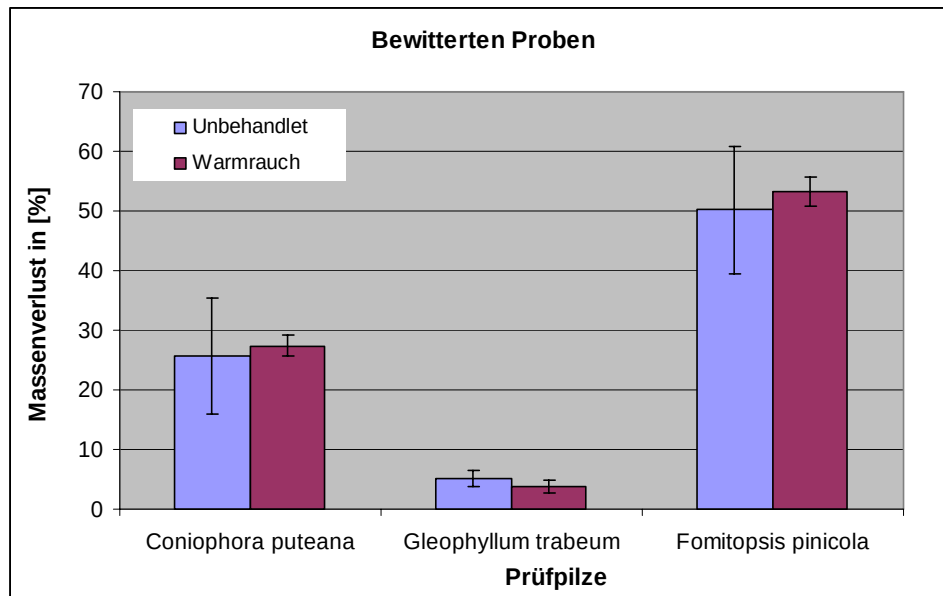


Abbildung 14 Holz-Abbau durch drei Pilzarten, nach Warmrauchbehandlung verglichen mit Referenz (ohne Behandlung), nach Bewitterung.

5.11 Wirtschaftliche Aspekte der Rauchbehandlung

Für die Abschätzung der Kosten einer Rauchbehandlung zwecks Holzrocknung und Holzschutz stützen wir uns auf die Erfahrungen und Kennwerte, die mit dem traditionellen Raucherzeuger der Marke Fessmann gesammelt wurden, in Kombination mit der speziell gebauten experimentellen Räucherammer (Dimensionen: 1000 x 1250 x 700 mm / Inhalt: 0.875 m³). Hier sind die Kostenfaktoren einerseits das Sägemehl für die Erzeugung des Glimmrauchs, andererseits der elektrische Strom die Zündstelle und für die Ventilatoren. Die hier dargestellten Ventilator-Werte müssten für eine mehrere m³ grosse Räucherammer, die eine kräftigere Luftumwälzung benötigt, angepasst werden.

Sägemehl (Fichte):

Sortiert auf 2-4 mm Faserlänge für Fleischräucherung
 20-Kg Säcke à 15.- CHF (Preis 0.75 CHF/Kg)
 Gebrauchte Menge: ca. 14 Kg/Tag (10.20 CHF / Tag)
 Für 14 Tage: 9 Säcke (180 Kg) mit Gesamtwert von 135.- CHF.

Für die Holzräucherung wäre eigentlich kein spezielles Fleischindustrie-Sägemehl nötig. Gewöhnliches Sägemehl mit einer Dichte von 160-175 kg/m³ ist für 12.- CHF/m³ erhältlich, was einen Kg-Preis von 0.07 CHF darstellt. Wert von 180 Kg: ca. 13.- CHF.

Der Verbrauch von 14 kg Sägemehl pro Tag entspricht, mit einem Brennwert von 4.2 kWh/kg, einer Energiemenge von 58.8 kWh. Die entsprechende Leistung der experimentellen Anlage ist von 58.8 : 24 = 2.45 kW. Auf ein Kammer-Nutzvolumen von 1 m³ bezogen ist dies eine spezifische Heizleistung von 2.8 kW/m³

Strombedarf:

Das Zündelement (elektrischer Widerstand) wird alle 12 Stunden für 2-3 min aktiviert. Ferner besitzt der Raucherzeuger einen Ventilator mit Leistung von 6.3 m³/min. Ein zusätzlicher Ventilator mit höherer Leistung (18 – 23 m³/min) garantiert eine gute Durchströmung der Räucherammer.

Für eine 14-tägige Behandlungsdauer wurde eine Strommenge von 76.33 kWh registriert. Mit einem durchschnittlicher Strompreis für Kleinbetriebe von 0.20 CHF / kWh ergibt dies Stromkosten von 15.- CHF. Diese Strommenge über diese Zeit entspricht einer Leistung von 227 W, was einer spezifischen Ventilatorleistung (pro m³ Kammer-Nutzvolumen) von 260 W/m³ entspricht.

Konventionnelle Trocknung:

Eine Untersuchung über den Energieverbrauch und Einsparmöglichkeiten von 19 technischen Holz Trocknungsanlagen (nach Frischluft-Abluft-Prinzip) ergibt stark streuende spezifische Ventilatorleistungen (von ca. 50 bis 240 W/m³) (Gloor 1996). Auf dieser Basis werden Trockenkammern mit Ventilatorleistungen von unter 100 Watt pro m³ Nutzvolumen als energieeffizient eingestuft. Auf das Volumen des getrockneten Holzes bezogen variiert der Ventilatorverbrauch zwischen 20 und 100 kWh/m³ (je nach Holzart, Ausgangs- und Endfeuchten, Brettdicke).

Bei den untersuchten Kammern stellt diese Studie ebenfalls stark streuende Energieverbräuche für die Heizung fest: die Nutzvolumenbezogene spezifische Heizleistung variiert zwischen 1.1 und 3.0 kW/m³. Im Durchschnitt sind dies 2.2 kW/m³, was das 17-fache der mittleren spez. Ventilatorleistung (130 W/m³) darstellt.

Vergleich:

Für die spezifische **Heizleistung** beträgt das Verhältnis „Räucher- / Konventionell“ = $(2.8 \text{ kW/m}^3) / (2.2 \text{ kW/m}^3) = \text{ca. } 1.25$

Für die spezifische **Ventilatorleistung** beträgt das Verhältnis „Räucher- / Konventionell“ = $(260 \text{ W/m}^3) / (100 \text{ W/m}^3) = 2.60$

Für die spezifische **Gesamtleistung** (Summe Heiz- und Ventilatorleistung) beträgt das Verhältnis „Räucher- / Konventionell“ = $(3.06 \text{ kW/m}^3) / (2.3 \text{ kW/m}^3) = 1.35$

So berechnet sind die Leistungen der experimentellen Anlage 2-fach ungünstig (während des Betriebs braucht sie sowohl mehr Heizenergie, wie auch mehr Ventilatorenergie). Es kann jedoch angenommen werden, dass bei der Wahl von vergleichbaren Kammer-Dimensionen statt Laborformat, die Heizleistung von einer Räucher- / Konventionell-Kammer wahrscheinlich ebenbürtig (eventuell günstiger) im Vergleich mit einer konventionellen Kammer sein könnte. Andererseits liesse sich der Einbau und Betrieb der Ventilatoren analog optimieren, wie dies für Frischluft-Abluft Trockenkammern empfohlen wird (Gloor 1996, Wyrsh 2003).

Ausgegangen von den Trocknungskosten pro m³ Holz nach konventionellem Frischluft-Abluft-Verfahren, wo der Aufwand für 18mm-Brettdicke und 12-14% Endfeuchte auf eine Dauer von ca. 3 Tagen geschätzt wird, was einem Gesamtbetrag (inkl. 2/3 für Handling) von 30.- bis 40.- CHF entspricht*, können für die **Rauchtrocknung pro m³ Holz** Mehrkosten von ca. 4.- bis 6.- CHF evaluiert werden.

Es muss jedoch hervorgehoben werden, dass die Rauchbehandlung die in diesem Bericht dargestellten zusätzlichen positiven Eigenschaften mit sich bringt. Diese neuen Qualitäten, wenn schon bei weitem nicht ausgeprägt wie bei thermisch behandeltem Holz, sind bei diesen geschätzten Mehrkosten von 4.- bis 6.- CHF **sehr günstig** produziert: die thermische Behandlung von Holz (Thermoholz / Retifizierung) kostet nämlich pro m³ zwischen 300.- und 500.- CHF**.

*) Persönliche Einschätzung F.Feiereisen, Despond SA, 1630 Bulle

**) Persönliche Angabe A.Schmutz, Balz Holz AG, 3550 Langnau i.E.

5.12 Mögliche Massnahmen zur Minderung der Emissionen

Eine allfällige Anlage zur Räucherung von Holz würde naturgemäss in einem bewohnten Kontext platziert sein. Somit werden von Gewerbeaufsichtsämtern und Umweltschutzbehörden verstärkt Forderungen nach Begrenzung der Emission von Kohlenstoffverbindungen, insbesondere von Phenolen und (bei uns messtechnisch auch festgestellten) Formaldehyden erhoben, sowie betreffend Feinpartikelproduktion.

Die Entwicklung von emissionsarmen Räucherverfahren wird somit zunehmend notwendig. Zwei Wege könnten hier Lösungen anbieten:

- Es wird ein Abgasreinigungsverfahren angewendet, durch Kombination von Elektrofilter mit Gaswäschern oder Aktivkohlefiltern. In einer ersten Filtrierstufe werden die sichtbaren Rauchpartikel (feste und flüssige Teilchen) elektrostatisch ausgeschieden. Die Teerfraktion lagert sich auf Abscheidplatten ab und wird periodisch nach einem automatischen thermischen Reinigungsprogramm abgeschmolzen. Der abfliessende Teer gelangt in einen Deponiebehälter unterhalb der Anlage. In einer zweiten Stufe werden die noch verbliebenen gasförmigen Bestandteile in Wäschern an eine alkalische Waschflüssigkeit gebunden. Die gereinigte Luft wird abschliessend mit einem Tröpfchenabscheider von Wassernebeln befreit und ins Freie geleitet (BMWA 2004).
- In einer solchen Anlage wird alternativ durch thermische Nachverbrennung der rauchbelasteten Abluft ein schadstoffarmes Abgas an die Umwelt abgegeben. In einer Versuchsanlage nach diesem Konzept wurden Heirauchprozesse gefahren, nach den Kriterien Emission, Energieverbrauch und Wirtschaftlichkeit optimiert. Abluftmenge und Energiebedarf sind so aufeinander abgestimmt, daß es möglich ist, die Abluft in der Heizung zu reinigen. Hierfür ist es nötig, die Heizung in einem Temperaturbereich von 750° C zu betreiben. Im Heirauchbereich zeigten die ausgeführten Anlagen ein günstiges Emissionsverhalten unter Einhaltung der in der TA-Luft geforderten Werte. (Weinbeck 1988).

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die fünf ersten punktuellen Aspekte illustrieren, dass durch die Verwendung von Rauch bei der Holz Trocknung spezifische, positive Effekte auch bei Fichtenholz erzielt werden können. Die Durchführung der restlichen Versuche und die Auswertung der gesamten Forschungsdaten erlauben uns, diese Möglichkeiten zu präzisieren, aber auch die Grenzen aufzuzeigen.

Zusammenfassend kann Folgendes festgehalten werden:

- **Trocknungsverhalten:** es ist grundsätzlich möglich, sowohl mit Warmrauch wie auch mit Kaltrauch Holz mindestens in den lufttrockenen Zustand zu führen, was den Anforderungen einer möglichen Einsatzform im Aussenbereich entspricht (wegen Geruchsentwicklung und Formaldehyd-Diffusion ist eine Verwendung in geschlossenen Räumen ausgeschlossen)
- **Schwindverhalten:** Wie schon bei Bambus beobachtet, findet effektiv eine messbare Formstabilisierung statt. Auch bei kleinen geräucherten Schindeln wird eine solche Reduktion des Schwind- und Quellverhaltens festgestellt, und dies ausgeprägter bei relativ breiteren Jahrringen
- **Hygroskopizität:** Die Aufnahmetendenz von Luftfeuchte ist reduziert, und zwar deutlicher bei schmalen Jahrringen und nach Warmrauchbehandlung. Die ergänzende Untersuchung des Feuchtegleichgewichtes mit kleinen Schindeln bestätigt dieses reduzierte Wasseraufnahmeverhalten
- **Farbveränderung:** Der künstliche Witterungsversuch (beschleunigte Alterung) zeigt ein ähnliches progressives Vergrauen wie bei unbehandeltem Holz, mit jedoch einer leicht dunkleren Tönung
- **Dauer der Rauchbehandlung:** Es braucht weniger als eine Woche, um mit Hilfe von Kaltrauch (unter 30°C) bei relativ dicken Schindeln (16 mm) eine Holzfeuchte von 11 % zu erreichen
- **Dampfdiffusionseigenschaften:** Im Unterschied zur Wasserdampfaufnahme ist die Wasserdampfpermeabilität oder –durchlässigkeit von geräucherten Proben praktisch unverändert im Vergleich mit unbehandelten Referenzproben
- **Kapillare Wasseraufnahme:** auch beim Aufstieg von Wasser durch die Holzstrukturen ist kein Unterschied zum Vergleichsmaterial feststellbar
- **Pilzresistenz:** Im nicht ausgewaschenen Zustand zeigen die geräucherten Proben einen erhöhten Widerstand gegen den Eingriff von holzabbauenden Pilzen. Die beobachtete Schutzwirkung geht jedoch durch künstliche Bewitterung (Auswaschung) praktisch vollständig verloren. Bei Gebäudehüllen ist aber zu bedenken, dass die Auswaschung nur in den äusseren Schichten und einseitig stattfindet
- **Wirtschaftlichkeit:** Die vergleichende Bilanz bei den aufzubringenden Leistungen ergibt ähnliche Verhältnisse für die experimentelle Räucherammer im Vergleich mit einer konventionellen technischen Anlage. Da der Rauch jedoch sehr schonend trocknet, könnte auf den Einsatz von Steuerungsvorrichtungen und -programmen verzichtet werden (bei tiefen und mittleren Rauchtemperaturen). Verglichen mit anderen Schutzverfahren bringt diese ökologische Methode einige positive Eigenschaftsmodifikationen zu einem sehr günstigen Preis
- **Emissionsminderung:** Eine Umsetzung der aufgezeigten Möglichkeiten müsste verknüpft werden mit einem technischen Konzept der Abgasbehandlung im Sinn der Luftreinhalte-Anforderungen.

Eine Aufgabe in der Folge dieser Versuche wird darin liegen, die beobachtete Auswaschbarkeit der Rauchsubstanzen (Yamamoto et al., 1998) durch Kombination mit untoxischen, wasserfesten Bindemitteln zu verhindern. Die Hypothese ist, dass eiweisshaltige Substanzen mit Phenolverbindungen reagieren und auch im Fall von geräuchertem Holz eine Art „Schutzhaut“ bilden könnten. Ferner sollte in Ergänzung zur Pilzresistenz der Widerstand gegen Insekten (z.B. Hausbock und Termiten) im Laborversuch getestet werden.

Die Rauchbehandlung könnte auch bei Laubhölzern wie Buche (*Fagus sylvatica*) und Pappel (*Populus sp.*) ausprobiert werden, was diesen Holzarten neue Einsatzgebiete zugänglich machen könnte. Eine solch skizzierte Technologie könnte dezentral im kleinen Massstab umgesetzt werden, mit dem Vorteil der Einfachheit. Die Haupteinschränkung für die Erzeugnisse liegt in den Verwendungsbereichen: ausschliesslich in Fassaden, als Dachstühle und als Schindeln.

7 BESTIMMUNGEN ZUM VORLIEGENDEN BERICHT

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der HSB auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der HSB. Ein Original dieses Berichts wird von der HSB für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Abteilungsleiters F+E und des Projektverantwortlichen gültig.

7.1 Umfang des Berichts

Dieser Bericht besteht aus 30 Seiten inkl. Anhang.

8 VERZEICHNISSE

8.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Rauchtypen und Behandlungszeiten	8
Tabelle 2: Konfiguration des Probenmaterials	9
Tabelle 3: Radialschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklima-Lagerung, von fasergesättigt bis darrtrocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.....	11
Tabelle 4: Tangentialschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklima-Lagerung, von fasergesättigt bis darrtrocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.....	12
Tabelle 5: Berechnete flächenmässige Querschwindung bei Kaltrauch- und Warmrauchbehandlung im Vergleich mit Normalklima-Lagerung, von fasergesättigt bis darrtrocken. Hervorhebung der stärksten Reduktionen mit Schattierungen.....	12
Tabelle 6 Gleichgewichtsfeuchten (Ausgleichsfeuchten) [in %] von Fichtenschindeln bei Temperatur 50°C, unter zwei verschiedenen relativen Luftfeuchten (25% / 65%). Vergleich von geräucherten Proben mit Referenzproben (unbehandelt) und mit den Literaturwerten.	17
Tabelle 7 Gemessene und berechnete Mittelwerte der unbehandelten und mit Warmrauch, resp. Hochtemperatur behandelten Proben zwischen 0% und 65% rel. Luftfeuchte	18
Tabelle 8 Gemessene und berechnete Mittelwerte der unbehandelten und mit Warmrauch, resp. Hochtemperatur behandelten Proben zwischen 100% und 65% rel. Luftfeuchte	19
Tabelle 9 Kapillare Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Warmrauch behandelten Proben, nach drei Probenrichtungen (Mittelwerte +/- Standardabweichung, in Kg / m ² * s0.5).....	20
Tabelle 10 Mittlerer Massenverlust, Standardabweichung und Befund mit Warmrauch behandelten Proben und unbehandelten Proben. Der angegebene Faktor gibt den Massenverlust nach Warmrauchbehandlung verglichen mit „Unbehandelt“ in % wieder. Gelb schattiert: nach allen Normkriterien dokumentierte schützende Wirksamkeit.	22

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Raucherzeugung für das Räuchern von Fleischprodukten bei der Firma Bigler AG	8
Abbildung 2: Fleischprodukte vor der Räucherung bei der Firma Bigler AG	9
Abbildung 3: Ausgangsfeuchten der drei Versuchsserien (Mittelwerte mit Standard- Abweichungen). C1AL: Warmrauch, 1 x 9 Stunden, Splintholz, breite Jahrringe. Höchstwerte zeigen immer die breitringigen Splintholzproben, die tiefsten Werte stammen aus engringigen Kernholzproben.....	10
Abbildung 4: Darrdichten der drei Versuchsserien (Mittelwerte mit Standard- Abweichungen). F4PE: Kaltrauch, 4 Wochen, Kernholz, enge Jahrringe. Engringige Splint- und Kernholzproben besitzen eine Darrdichte um 0.40 g/cm ³ , breitringige um 0.30 g/cm ³	10
Abbildung 5: Verlauf des Feuchtegehaltes des Holzes bei Warmrauch- (C), Kaltrauch- (F) und Vergleichstrocknung (T). 1=9 Stunden / 2=18 Stunden / 3=36 Stunden / 4=1 Woche / 5=2 Wochen / 6=4 Wochen. Für jeden Zeitpunkt werden nur die jeweiligen 2 Extremmittelwerte dargestellt.	11
Abbildung 6 Hygroskopisches Verhalten der breitringigen Proben nach Kaltrauch- (F) und Warmrauchbehandlung (C) im Vergleich mit Normalklima-Lagerung (T), unter 3 verschiedenen Feuchtebedingungen.	12
Abbildung 7 Variation des a-Wertes (grün/rot-Achse im I-a-b - Farbmess-System), für die Varianten Kaltrauch (F), Warmrauch (C) und Referenz (T), im Zusammenhang mit verschiedenen künstlichen Bewitterungszeiten. Die a-Werte befinden sich auf einer Gradienten: -100 (grün) bis +100 (rot). Die warmrauchbeandelte Probenserie(C) ist ursprünglich die "rötteste", gleicht sich aber im generellen Vergrauen den anderen an.	13
Abbildung 8 Kaltrauch: Hauptkomponentenanalyse (ACP) nach elektronischer Geruchsanalyse, anhand der Werte gruppiert nach den 3 verschiedenen Entnahmetiefen. Die Überlagerung der Positionen bedeutet, dass die tieferen Proben eine ähnliche Geruchsintensität aufweisen wie diejenigen direkt unter der Oberfläche (Diskriminierung: 60 %).	14
Abbildung 9 Schindelfeuchte nach unterschiedlicher Dauer der Rauchbehandlung.	15

Abbildung 10	Dimensionsänderung von Fichten-Schindeln zwischen Fasersättigung und darrtrockenem Zustand, nach unterschiedlichen Modalitäten der Rauchbehandlung, verglichen mit Referenz (ohne Behandlung) und Literaturwert (Treorie). Mittelwerte mit Standardabweichung. Dunkel: feinere Jahrringe; hell: breitere Jahrringe. R = Warmrauch / RStg = Warmrauch, Stirnholz mit flüssigem Rauchextrakt getränkt / RGes = Warmrauch, nach Wassersättigung durch Eintauchen / RGesKa = wie RGes, kalt gelagert vor Räucherung / RGesStg = wie RGes, Stirnholz mit flüssigem Rauchextrakt getränkt / RGesKaStg = dito, zusätzlich kalt gelagert vor Räucherung.	16
Abbildung 11	Versuchsanordnung für die Dampfdurchlässigkeitsbestimmung, mit einem Gefäss unter Labor- Normalbedingungen (20°C / 65% rel. Luftfeuchte) platziert, entweder Wasser oder ein Trocknungsmittel (Silikagel) enthaltend.....	18
Abbildung 12	Kapillare Wasseraufnahme der unbehandelten und mit Warmrauch behandelten Proben, nach drei Probenrichtungen (Mittelwerte +/- Standardabweichung, in Kg / m2 * s0.5). Hell: unbehandelt (Referenz) / dunkel: mit Warmrauch behandelt.	20
Abbildung 13	Holz-Abbau durch drei Pilzarten, nach Warmrauchbehandlung verglichen mit Referenz (ohne Behandlung), unbewittert.....	22
Abbildung 14	Holz-Abbau durch drei Pilzarten, nach Warmrauchbehandlung verglichen mit Referenz (ohne Behandlung), nach Bewitterung.	23

8.3 Diagrammverzeichnis

-- --

8.4 Literaturverzeichnis

BMWA (2004): Technische Grundlage für die Beurteilung von Einwirkungen, die beim Betrieb von Koch-, Selch-, Brat- und Backanlagen auftreten können und Abhilfmassnahmen. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, D

BOSSHARD, H.H. (1975): Holzkunde, Bd.3. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart

ISHIGURI, F., MASUBUCHI, N., MARUYAMA, S., ANDOH, M., YOKOTA, S., YOSHIZAWA, N. (2001): Changes in Wood Quality in Conifer Woods by Smoke Heating. 7th International IUFRO Wood Drying Conference (July 9 - July 13, 2001), Tsukuba International Congress Center, Japan

JACQUIOT, CL. ET MME KELLER-VAILLANT (1951): L'Arbre II: La Préservation des Bois. Hermann et Cie, Editeurs, Paris

GAYOUT, V. (2002): Projet "Séchage du bois par la fumée", Provis. Forschungsbericht SH-Holz, Biel

HOMPESCH, H. (1987): SMOG - Macht er uns wirklich krank? Verlag Haupt, Bern

NOMURA, T. (1999): Bamboo Utilization in Myanmar. Wood Research (Kyoto University) Nr.86: 9-18

RAUCH, E. (1983): Anleitung zum Bau von Raeucherkammern und zum Raeuchern von Fleisch. Working Paper SKAT, St.Gallen

RICHTER, K. (1989): Zur Ökobilanz von Holz als Baustoff: Erste Erhebung. EMPA, Dübendorf

TÓTH, L. (1982): Chemie der Räucherung. Verlag Chemie, Weinheim D

VORREITER, L. (1958): Holztechnologisches Handbuch, Bd.2. Verl. G.Fromme & Co., Wien und München

WEINBECK, K-H. (1988): Entwicklung emissionsarmer Räucherverfahren zur Herstellung von Fleisch- und Wurstwaren (Abschlussbericht). VEMAG Maschinenbau GmbH, 27266 Verden, D

WITTKOWSKI, R. 1985: Phenole im Räucherrauch. Nachweis und Identifizierung. DFG / VCH, Weinheim

YAMAMOTO, K., MOMOHARA, I., NISHIMURA, T. (1998): Fungal resistance of smoke-dried Cryptomeria japonica wood. International Research Group on Wood Preservation, IRG/WP, SE-10044 Stockholm

BERICHTE (AN DER AHB ABGELEGT)

Autor(en)	Ort	Titel	Jahr
Gayout Vincent	AHB-Biel / Enstib-Epinal F	Séchage et préservation du bois par la fumée	2002
Dr. T. Zesiger	SMart Nose, Marin NE	Rapport n° 02149 Analyse d'Epicéa traité par la fumée	2002
Peter Oliver	Fachhochschule Lippe und Höx- ter	Rauchgastrocknung	2003
Bollhalder Karl Vögtli Nicola	AHB-Biel	Rauchgase und ihre schützende / konsevie- rende Wirkung auf Holz	2003
Bartlomé Olin Oelhafen Mat- thias	AHB-Biel	Vergütung von Fichtenschindeln mittels Rauch	2004
Jakob Markus	ETH-Zürich / AHB-Biel	Unkonventionnelle Methoden der Oberflä- chenbehandlung von Holz (Diplomarbeit)	2004
Bottinelli Misha Goetschy Bruno	AHB-Biel	Traitement de bardeaux à la fumée tempérée	2004
Hofer Andreas Volet Philippe	AHB-Biel	Protection du bois au moyen d'une subs- tance organique combinée à la fumée	2005
Rutz Simon Thommen David	AHB-Biel	Reduzierung der Brennbarkeit von Weisstän- nen- und Buchenholz mittels organisch / mi- neralischer Behandlung	2006