

Untersuchungen zu ausgewählten Eigenschaften von Fichtenklangholz aus Graubünden

Walter Sonderegger · Pascal Alter · Peter Niemz

Published online: 22 August 2008
© Springer-Verlag 2008

Zusammenfassung Fichtenklangholz von drei verschiedenen Standorten aus dem Kanton Graubünden/Schweiz wurde hinsichtlich verschiedener physikalisch-mechanischer Eigenschaften geprüft. Von einem Standort wurde das Holz zusätzlich drei Monate wassergelagert, um den Einfluss der Extraktstoffe zu testen. Die Untersuchungen umfassten eine Analyse der Jahrringstruktur, Schallmessungen mit Longitudinal- und Transversalwellen in den drei Hauptschnittrichtungen, Biegefestigkeit und Biege-*E*-Modul, Eigenfrequenzmessungen und die Ermittlung des logarithmischen Dekrements der Schwingungsdämpfung. Ferner wurden das Sorptionsverhalten und die Quellung bestimmt. An Einzelproben wurde zudem der Extraktstoffanteil ermittelt. Die untersuchten Holzeigenschaften weisen an allen Standorten auf Klangholz von hoher Qualität hin. Zwischen den drei untersuchten Standorten wurden, außer aufgrund der unterschiedlichen Dichte bedingt, keine signifikanten Unterschiede in den Holzeigenschaften festgestellt. Die Wasserlagerung führte zum Herauslösen von Extraktstoffen, die Eigenschaften änderten sich jedoch nicht signifikant.

Investigations on selected properties of tonal wood of spruce from Grisons

Abstract This survey focuses on the mechanical properties of spruce tonal wood from three different locations in the canton of Grisons, Switzerland. In addition, the material from one location was stored under water for three months in order to test the influence of extractives.

W. Sonderegger (✉) · P. Alter · P. Niemz
Institut für Baustoffe, Holzphysik, ETH Zürich,
Schafmattstraße 6,
8093 Zürich, Schweiz
e-mail: wsonderegger@ethz.ch

The tests included the analysis of the annual ring structure, measurements of the sound velocity with longitudinal and transverse waves in the three main directions, bending strength, bending modulus of elasticity (MOE), eigenfrequency, logarithmic decrement of the damping, sorption and swelling. Single specimens were taken to measure the extractives content.

The tested wood properties suggest tonal wood of high quality for all the locations. No significant differences of the wood properties, except density-related ones, were found between the three locations. The water storage resulted in the removal of extractives, but no significant change in properties could be found.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Klangholz ist ein Holzsortiment, das für Musikinstrumente eingesetzt wird. Es muss hohen Anforderungen genügen. Es zeichnet sich im anatomischen Bau durch eine hohe Gleichmäßigkeit aus. Es besitzt eine niedrige Dichte und eine besonders in radialer Richtung hohe Steifigkeit. Die an das verwendete Holz gestellten Ansprüche liegen über denen von Furnierholz. Diese Eigenschaften erfüllen nur wenige Holzarten. In Mitteleuropa steht die Fichte bei der Verwendung als Klangholz seit dem 15. Jahrhundert an erster Stelle (Bariska 1996b).

Im Rahmen der Arbeit wurde Fichtenholz (*Picea abies* (L.) Karst.) von drei verschiedenen Standorten der Schweizer Alpen (Kanton Graubünden) auf die Eignung als Klangholz hin untersucht, wobei sich die Standorte bezüglich Höhenlage und Klima unterschieden. Dabei wurden folgende Eigenschaften geprüft (vgl. dazu ausführlich Alter 2007):

Tabelle 1 Technische Anforderungen an Klangholz; Auszug aus TGL 15799/12 nach Holz (1984); Zahlen in Klammern gelten ab einer bestimmten Durchmessergruppe (Norm nicht mehr gültig)

Table 1 Standards for tonal wood; extract from TGL 15799/12 according to Holz (1984); figures in brackets apply from a certain diameter class (standard invalid)

Merkmal	Einheit	Qualität		
		K1	K2	K3
Min. Zopfdurchmesser	cm	35	35	30
Min. Klangholzzone ¹	cm	12	12	8
Max. Äste bis 2 m Länge	#	0	3(6) ²	3(6) ²
Darüber max. Astquirle je 1m Länge	#	0	2	2
Max. Astdurchmesser	cm	–	2	2
Max. Jahrringbreite	mm	2	3(4) ²	3(4) ²
Max. Breitendifferenz aufeinander folgender Jahrringe	mm	0,5	1,0	1,0
Kriterien gelten für einen Anteil der Querschnittsfläche von	%	75	75	75

¹ Als Klangholzzone gilt der feinringige erwachsene äußere Teil des Stammes, welcher für den Musikinstrumentenbau verwendet wird.

² Zahlen in Klammern gelten ab einem bestimmten Durchmesser

1. Jahrringbreite und Dichte.
2. Schallgeschwindigkeit längs, radial und tangential mit Longitudinal- und Transversalwellen, Berechnung der elastischen Konstanten unter Verwendung der Schallgeschwindigkeit.
3. *E*-Modul und Festigkeit bei statischer Biegung.
4. Eigenfrequenz bei Biegeschwingung, mechanische Dämpfung (logarithmisches Dekrement), Berechnung des Biege-*E*-Moduls unter Verwendung der Eigenfrequenz.
5. Sorptionsverhalten und Quellung radial und tangential.

Am Holz eines Standortes wurde zusätzlich der Einfluss der Inhaltsstoffe ermittelt.

1.2 Stand der Kenntniss

Gemäß der Brockhaus Enzyklopädie (1970) ist Klangholz (bzw. die synonym verwendeten Begriffe Resonanzholz und Tonholz) ein Holz mit besonders gleichmäßigem Jahrringaufbau, welches für den Klavier- und Geigenbau verwendet wird (insbesondere Fichte).

Der Begriff wird jedoch häufig weniger eng gefasst und für alle Hölzer benutzt, welche für den Musikinstrumentenbau verwendet werden (vgl. z.B. Bariska (1996b), der einen Überblick über die meistgebrauchten Holzarten im Holzinstrumentenbau Mitteleuropas gibt). Das Holz-Lexikon (2003) definiert Klangholz (Tonholz, Resonanzholz) allgemein als „Holz mit sog. akustischem Nutzeffekt hinsichtlich Resonanzfähigkeit, Schallverstärkung, Tragfähigkeit der Töne“.

Demgegenüber wird im Lexikon der Holztechnik (1988) zwischen den Begriffen Klangholz und Resonanzholz unterschieden. In Anlehnung an die ehemalige DDR-Norm TGL¹ 15799/12 wird Klangholz als Bezeichnung für das

¹ TGL: Technische Güte- und Lieferbedingungen. Die TGL waren in der ehemaligen DDR das Äquivalent zu den Normen des westdeutschen Instituts für Normung (DIN). Zuständig für die TGL war das Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW) der DDR in Berlin.

Rundholzsortiment verwendet, welches für die Herstellung von Musikinstrumenten mit Saiten eingesetzt wird. Darunter fallen die Holzarten Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L., *Acer platanoides* L.). Klangholz ist ein sehr hochwertiges, meist preislich über dem Furnierholz liegendes Sortiment und fällt nur einzelstammweise an. Gemäß TGL 15799/12 werden drei Güteklassen unterschieden (Tabelle 1). Dabei wird die Güteklasse K1 vorwiegend für kunsthandwerklich gefertigte Streich- und Zupfinstrumente, K2 für Decken von Serieninstrumenten und Klavier-Resonanzholz und K3 für Rippen und Klaviatur von Klavieren eingesetzt (Holz 1984).

Als Resonanzholz werden die aus dem Klangholzsortiment hergestellten Zuschnitte bezeichnet, welche sodann je nach Güteklasse zur Fertigung von Korpusdecken bei Streich- und Zupfinstrumenten oder Resonanzböden bei Tasteninstrumenten verwendet werden. Diese werden meistens radial eingeschnitten oder gespalten, so dass die Kanten parallel zur Faserrichtung verlaufen und die Querschnittsfläche stehende Jahrringe aufweist. Der Einfluss der Faserwinkelabweichung und Jahrringneigung auf die Eigenschaften von Resonanzholz wurde von Holz und Kluck (1997a,b) eingehend untersucht.

In der Schweiz gibt es keine Normen hinsichtlich der Qualität des Rundholzes für den Musikinstrumentenbau. Das Sortiment Klangholz wird daher nicht gesondert ausgewiesen, jedoch werden von Friedli (2000) folgende, wichtige Kriterien zur Identifizierung von Klangholz aufgeführt:

- Kein Drehwuchs,
- regelmäßiges Wachstum,
- gerader Stamm,
- symmetrische Krone,
- Astfreiheit auf 5 m oder mehr,
- runde Form, Durchmesser über 55 cm,
- kein Druckholz,
- keine Verletzungen,
- keine Harzgallen.

Holz (1984), der sich über Jahrzehnte forschungsseitig mit Klangholz befasste, gibt für Resonanzholz weitere Kriterien an:

- Die Häufigkeitsverteilung der Jahrringbreite ist eingipflig,
- die Standardabweichung der Jahrringbreite liegt unter 0,75 mm,
- der Spätholzanteil beträgt zwischen 20 und 33 Prozent.

Dadurch werden hohe Anforderungen an die Jahrringbreite gestellt, da nur ein stetiger Jahrringbau mit gleichmäßigen Spätholzanteilen eine ausreichende Steifigkeit des Holzes in radialer Richtung garantiert.

Bezüglich Standort werden von Zimmermann (1996) folgende Kriterien für Klangholz genannt:

- Höhenlage über 1000 m.ü.M.: Dort ist die Vegetationsperiode kurz genug, um die geforderte, enge Jahrringbildung zu gewährleisten.
- Dichter Bestand: Dadurch entwickeln sich kleine, symmetrische Kronen mit langen selbst aufgeasteten Stämmen.
- Ein saurer, durchlässiger, eher magerer Boden ist ein Garant für weniger Stockfäule.
- Der Baum sollte auf einer Terrasse stehen: Hanglage begünstigt die Bildung von unerwünschtem Druckholz.
- Standorte mit Schneedruck und vorherrschende Windlage sind wegen Druckholzbildung zu meiden.

Teilweise wird in der Literatur auch auf eine qualitätsverbessernde Wirkung des Flößens verwiesen. So lagen bei den Venezianern, welche zu Stradivaris Zeiten das Monopol für den Holzhandel besaßen, die Baumstämme monatelang im Brackwasser der Lagunen und nahmen dabei neben Mineralien auch Salze auf, für Nagyvary (in Anonymus 2001) eine wichtige Ausgangsbasis für das spätere gute Klangvermögen des Holzes. Gemäß Bariska (1978) wirken Kalksalze hydrophobierend und machen das Holz träge gegenüber Feuchtigkeitswechseln der Umgebung. Nach Feuerstein (1935) haben sich Versuche, einzig durch Auslaugen das Holz tonlich zu verbessern, nicht bewährt.

Gemäß Holz (1967) und Holz (1984) zeichnet sich Resonanzholz durch ein hohes Verhältnis von Elastizitätsmodul zu Dichte aus. Ebenfalls wird meistens davon ausgegangen, dass Klangholz einen hohen Wert des Resonanzquotienten (Q_R) nach Gl. 1 hat. Er lässt sich aus der Schallgeschwindigkeit oder dem Elastizitätsmodul und der Rohdichte berechnen:

$$Q_R = \frac{c}{\rho} = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (1)$$

Q_R : Resonanzquotient [m^4/kg bzw. m^5/Ns^3]

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

ρ : Rohdichte [kg/m^3]

E : E -Modul parallel zur Faser [N/mm^2]

Eine weitere Kenngröße ist die mechanische Dämpfung. Holz hat im Vergleich mit Metallen eine sehr hohe Dämpfung (Bariska 1996a). Diese kann durch lange Lagerung und schonendes Trocknen niedrig gehalten werden (Bariska 1978). Die Dämpfung ist frequenzabhängig und nimmt ab 2000 Hz stark zu (Holz 1967, 1973). Sie korreliert mit dem E -Modul (Lexikon der Holztechnik 1988). In Faserrichtung sind die Unterschiede von E -Modul und Dämpfung zwischen eng- und weitringigem Holz bei gleicher Rohdichte gering (Holz und Kluck 1997a).

In Radialrichtung liegt der E -Modul wesentlich tiefer als in Faserrichtung. Das Verhältnis E_L/E_R kann 10 : 1 bis 40 : 1 betragen. Bei gutem Resonanzholz kann man wegen dem hohen E_R meist von Verhältnissen unter 15 : 1 ausgehen (Holz und Kluck 1997a).

Da der E -Modul direkt aus der Schallgeschwindigkeit bestimmt werden kann, wird für Resonanzholz eine möglichst hohe Schallgeschwindigkeit in Faserrichtung und in radialer Richtung gefordert. Zwischen Schallgeschwindigkeit und Jahrringbau besteht in radialer Richtung ein deutlicher Zusammenhang. In Faserrichtung besteht keine eindeutige Abhängigkeit der beiden Größen voneinander (vgl. Lexikon der Holztechnik 1988).

Bezüglich Quell- und Schwindverhalten wird in der Fachliteratur übereinstimmend die Meinung vertreten, dass das Holz langsam getrocknet und möglichst lange gelagert werden sollte. Dadurch werden Eigenspannungen im Holz abgebaut. Mit zunehmender Lagerdauer verringert sich der Variationskoeffizient der Quell- und Schwindwerte, die Mittelwerte bleiben gleich (Holz 1967, 1984).

2 Versuchsmaterial und Methoden

2.1 Material

Standörtliche Angaben Es wurde Fichtenholz (*Picea abies* (L.) Karst.) von drei verschiedenen Standorten in den Schweizer Alpen (Kanton Graubünden) untersucht (Tabelle 2). Pro Standort wurden vier für Klangholz in Frage kommende Bäume ausgesucht. Diese waren 175–270 Jahre alt und hatten sehr schmale Jahrringe. Die Jahrringbreite, gemittelt über den gesamten Querschnitt, lag bei 1,2–2,3 mm. Das Holz wurde zwischen Oktober 2005 und Februar 2006 geschlagen. Die Standorte befanden sich in den nördlichen Zwischenalpen in der Nähe der Ortschaften Flims, Obersaxen und Thusis auf 1000 bis 1600 m ü.M. und waren Nord bis Nordwest exponiert. Das Klima in dieser Region ist ozeanisch bis kontinental mit mittleren Niederschlägen (weniger als 1200 mm pro Jahr auf über 1000 m.ü.M.) und größeren täglichen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen (vgl. Ott et al. 1997). Thusis unterscheidet sich von den anderen Standorten hauptsächlich

Tabelle 2 Angaben zu den untersuchten Klangholzbäumen
Table 2 Datas of the investigated tone wood trees

Standort (Höhe) [m ü.M.]	Stamm-Nr.	Alter [Jahr]	Jahringbreite [mm]
Flims (1000–1050)	1	175	1,94
	2	183	2,03
	3	185	2,17
	4	181	2,28
Obersaxen (1500–1600)	1	253	1,18
	2	271	1,26
	3	220	1,79
	4	234	1,60
Thusis (1500–1600)	1	220	1,91
	2	190	2,31
	3	205	2,00
	4	205	1,97

bezüglich des geringeren Niederschlags und ist daher eher kontinental geprägt.

Vorbereitung des Holzes Beim Einschnitt wurden zunächst pro Stamm mindestens drei Bretter (vom Standort Thusis je sechs Bretter) mit den Mindestmaßen 560 mm (längs) × 150 mm (radial) × 30 mm (tangential) herausgeschnitten, um später daraus die benötigten Proben herstellen zu können. Die Bretter wurden auf 1600 m.ü.M. an der Luft vorgetrocknet. Zum Test des Einflusses einer Wasserlagerung wurde die Hälfte der Bretter des Standortes Thusis in einem Brunnen gelagert. Die Bretter wurden zu Dreierpaketen zusammengebunden, hochkant längs zur Wasserflussrichtung aufgereiht und mittels Pflastersteinen beschwert. Die Wasserlagerung dauerte 92 Tage (Juli 2006 bis Oktober 2006). Der Brunnen hatte ein Fassungsvermögen von ca. 600 Liter Wasser und einen Durchfluss von etwa 8500 Liter pro Tag. Die durchschnittliche Temperatur des Wassers im Brunnen betrug zwischen 8 und 10 °C. Nach der Entnahme aus dem Brunnen wurden die Bretter drei Wochen an der Luft vorgetrocknet.

Zuschnitt der Proben Aus den Brettern wurden nach der Freiluftlagerung Biegestäbe (400 mm längs × 20 mm radial × 20 mm tangential) mit Übermaß zugeschnitten und anschließend im Normalklima (20 °C und 65% relative Luftfeuchte) bis zur Gleichgewichtsfeuchte klimatisiert. Von einem Ende wurden sodann Quellungsproben mit Abmessungen von 10 mm längs × 20 mm radial × 20 mm tangential entnommen. Nach der Biegeprüfung wurde aus jedem Biegestab ein Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm für Schallmessungen herausgeschnitten. Je Standort bzw. Variante wurden 40 Proben verwendet.

2.2 Methoden

Jahrringanalyse Sowohl an den Biegestäben als auch an den Würfelproben wurde die mittlere Jahringbreite anhand der Querschnittsfläche bestimmt. Bei den Biegeproben

wurde dieses Verfahren auf beiden Hirnseiten angewendet und dann der Mittelwert berechnet.

Durchschallung Die Schallgeschwindigkeiten der Biegeproben wurden in Faserrichtung mit dem Ultraschall-Prüfgerät BP5 (Fa. Georg Steinkamp, Deutschland) bei einer Frequenz von 50 kHz ermittelt. In Biegestäben, sofern deren Breite und Dicke klein gegenüber der Wellenlänge sind, pflanzt sich der Schall als Dehn- oder Quasilongitudinalwelle fort. Aus der Schallgeschwindigkeit lässt sich der E -Modul nach folgender Formel bestimmen (Niemz 1993):

$$E_c = c_D^2 \rho 10^{-6}. \quad (2)$$

E_c : E -Modul aus Schall [N/mm²]

c_D : Schallgeschwindigkeit der Dehnwelle [m/s]

ρ : Dichte [kg/m³]

An den würfelförmigen Proben wurden Messungen mit Longitudinal- und Transversalwellen durchgeführt. Dabei erfolgten die Messungen in allen drei Hauptschnitttrichtungen: längs (L), radial (R) und tangential (T). Insgesamt wurden neun Schallgeschwindigkeiten pro Probe bestimmt. Die Schallgeschwindigkeiten c_{ij} (i = Ausbreitungsrichtung; j = Richtung der Auslenkung der Welle) wurden mit dem Ultraschall-Prüfgerät USK 7 D (Krautkrämer GmbH & Co., Hürth) gemessen. Für die Longitudinalwellen wurden die Prüfköpfe CX203 UTX (10 MHz, Ø 12,7 Millimeter) verwendet, für die Transversalwellen die Prüfköpfe S-0104 (1 MHz, Ø 12,7 Millimeter).

Die Geschwindigkeit wurde bei einem Schwellenwert von 90% der maximalen Amplitude gemessen. Eine Anpressvorrichtung gewährte einen konstanten Anpressdruck der Prüfköpfe. Als Kopplungsmittel zwischen den Prüfköpfen und dem Holzwürfel diente Honig. Bei den Longitudinalwellen wurde das Signal an der Flanke der ersten ankommenden Welle gemessen. Die Transversalwellen LR/RL und LT/TL wurden bei der zweiten ankommenden Welle gemessen, RT/TR bei der vierten, da die früher ankommenden Wellen den durch die Prüfköpfe nicht gänzlich unterdrückten Longitudinalwellen und deren Reflexionen zuzuordnen waren.

Aus den Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwellen wurden analog Gl. 2 wie beim Biegestab die E -Moduli berechnet und aus den Schallgeschwindigkeiten der Transversalwellen die Schubmoduli gemäß Gl. 3 bestimmt:

$$G_{ij} = c_{ij}^2 \rho. \quad (3)$$

G_{ij} : Schubmodul

c_{ij} : Schallgeschwindigkeit

(i = Ausbreitungsrichtung, j = Richtung der Auslenkung)

ρ : Dichte

Dabei gilt näherungsweise: $G_{ij} = G_{ji}$.

Eigenfrequenzmessungen und Berechnung des logarithmischen Dekrements Die Eigenfrequenzmessung erfolgte mit dem Prüfgerät GrindoSonic MK5 Industrial der Fa. J.W. Lemmens. Die Proben wurden in den Schwingungsknoten (bei 0,224 und 0,776 der Probenlänge) aufgelagert und durch manuelles Anschlagen zum Schwingen erregt (Görlacher 1984).

Anhand der Eigenfrequenz wurde der Elastizitätsmodul mittels folgender Gleichung nach (Görlacher 1984) berechnet:

$$E_f = \frac{4\pi^2 l^4 f_0^2 \rho}{m_n^4 i^2} \left(1 + \frac{i^2}{l^2} K_1 \right) 10^{-6} \quad (4)$$

E_f : E -Modul aus Eigenfrequenz [N/mm²]

l : Stablänge [m]

f_0 : Resonanzfrequenz [s⁻¹]

ρ : Rohdichte [kg/m³]

i : Trägheitsradius in Richtung der Biegeschwingung [m]; für rechteckige Querschnitte gilt: $i^2 = h^2/12$

K_1 und m_n^4 : Konstanten, abhängig von der Ordnung der Schwingung (für Schwingungen 1. Ordnung gilt:

$$K_1 = 49,48, m_n^4 = 500,6)$$

Zur Ermittlung der Dämpfung wurde die Abklingkurve der Schwingung mittels eines Velleman PC SOPE PCS32 und der Software WinDSO_FG32 erfasst und daraus das logarithmische Dekrement anhand 30 aufeinander folgender Amplituden der Abklingkurve gemäß folgender Formel berechnet (vgl. Krautkrämer und Krautkrämer 1986):

$$\Lambda = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (5)$$

Λ : logarithmisches Dekrement

A : Amplitude

Statischer Biegeversuch Für die Biegeversuche wurde eine Dreipunktbiegung nach DIN 52186 mit der Material-Prüfmaschine Zwick Z100/TL3S (Zwick GmbH & Co. Ulm) durchgeführt. Es wurde der statische E -Modul (zwischen 10 N/mm² und 30 N/mm²), die Biegefestigkeit sowie die Arbeit bis zur Maximalkraft ermittelt. Der Resonanzquotient wurde nach Gl. 1 aus dem statischen E -Modul und der Rohdichte berechnet.

Sorption, Quellung, Schwindung Die Sorptionsversuche wurden nach DIN 52184 durchgeführt. Die Proben wurden bei 40 °C vorgetrocknet. Danach wurden sie in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 20 °C und den relativen Luftfeuchten von 35, 50, 65, 80 und 93% bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte befeuchtet, anschließend in den gleichen Stufen rückgetrocknet und zuletzt darrgetrocknet. Je Stufe wurden das Gewicht und die Abmessungen bestimmt.

Extraktstoffe Für die Analyse der Extraktstoffe wurden vier Holzproben aus einem Stamm des Standortes Thusis verwendet (je eine Probe Kernholz unbehandelt und wassergelagert sowie je eine Probe Splintholz unbehandelt und wassergelagert). An jeder Probe wurden zwei Messungen durchgeführt. Es wurde der Ethanol-Toluol Extrakt sowie der Heiß- und Kaltwasserextrakt nach der Tappi Norm T 204 cm-97 bestimmt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Jahrringanalyse und Klima

Die mittlere Jahrringbreite der Biegeproben lag bei den Standorten Flims und Thusis sehr nahe beieinander und be-

Tabelle 3 Ergebnisse der Untersuchungen an den Biegeproben. JR-Br = Jahrringbreite, c = Schallgeschwindigkeit, E_C = E -Modul aus Schallgeschwindigkeit, E_f = E -Modul aus Eigenfrequenz, E_{DIN} = statisches Biege- E -Modul, σ_{bB} = Biegefestigkeit, W_{Fmax} = Arbeit bis zur Maximalkraft, Q_R = Resonanzquotient, Λ = logarithmisches Dekrement

Table 3 Results of the tested bending specimens. JR-Br = annual ring width, c = ultrasound velocity, E_C = MOE calculated from sound velocity, E_f = MOE calculated from eigenfrequency, E_{DIN} = static MOE in bending, σ_{bB} = static MOR in bending, W_{Fmax} = work up to maximal load, Q_R = resonance quotient, Λ = logarithmic decrement

Standort	Anzahl [-]	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	JR-Br [mm]	c [m/s]	E_C [N/mm ²]	E_f [N/mm ²]	E_{DIN} [N/mm ²]	σ_{bB} [N/mm ²]	W_{Fmax} [Nmm]	Q_R [m ⁵ /N s ³]	Λ [-]
Flims	40 (26) ¹	12,8	435	1,54	6110	16300	13200	12200	79,5	10600	12,2	0,0316
			$v = 4,3$	$v = 22,5$	$v = 3,6$	$v = 10,0$	$v = 10,5$	$v = 10,2$	$v = 8,3$	$v = 11,9$	$v = 4,0$	$v = 21,6$
Obersaxen	40 (32) ¹	12,8	411	1,26	5840	14000	11200	10500	71,6	9370	12,4	0,0322
			$v = 8,8$	$v = 35,3$	$v = 2,8$	$v = 10,7$	$v = 10,9$	$v = 11,3$	$v = 13,0$	$v = 28,8$	$v = 9,0$	$v = 12,6$
Thusis unbehandelt	40 (27) ¹	12,3	391	1,57	5660	12500	9980	9270	64,6	7640	12,5	0,0331
			$v = 5,8$	$v = 29,5$	$v = 4,0$	$v = 10,2$	$v = 12,3$	$v = 12,8$	$v = 9,5$	$v = 21,8$	$v = 7,5$	$v = 22,1$
Thusis wassergelagert	40 (37) ¹	12,9	393	1,56	5650	12500	10100	9410	65,6	8170	12,6	0,0326
			$v = 9,6$	$v = 29,4$	$v = 4,6$	$v = 10,7$	$v = 11,1$	$v = 11,2$	$v = 10,6$	$v = 26,6$	$v = 11,7$	$v = 18,3$

¹ Zahlen in Klammern geben die Anzahl der Proben wieder, welche zur Berechnung des logarithmischen Dekrements (Λ) herangezogen werden konnten.

trug 1,54 bzw. 1,57 mm (Tabelle 3). Einen deutlich niedrigeren Wert weist mit 1,26 mm Obersaxen auf, jedoch ist bei allen Standorten ein relativ hoher Variationskoeffizient vorhanden, welcher vor allem auf die Zunahme der Jahrringbreite von der Rinde Richtung Mark zurückzuführen ist. Bei den Würfelproben sind dieselben Tendenzen sichtbar (Tabelle 5). Es zeigte sich, dass bei allen Standorten die Jahrringbreiten deutlich unterhalb der von der TGL 15799/12 geforderten 2 mm für die höchste Qualitätsklasse liegen (s. Tabelle 1).

Die Dichte lag bei allen Standorten aufgrund der Höhenlage eher im unteren Bereich der von Wagenführ (2007) allgemein für Fichte angegebenen Werte. Dabei weist das Holz von Flims als niedrigstem Standort die höchste Dichte auf. Dies ist hauptsächlich auf einen größeren Spätholzanteil bei gleicher Jahrringbreite zurückzuführen, da die Bildung von Spätholz unter vergleichbaren Bodenverhältnissen vom klimatischen Optimum nach kälteren Gebieten zu infolge kürzerer Vegetationsperioden abnimmt (vgl. Mette 1984). Bei den beiden subalpinen Standorten ist die höhere Dichte des Holzes von Obersaxen hauptsächlich durch die niedrigere Jahrringbreite zu erklären, da die Dichte bei Fichtenholz mit abnehmender Jahrringbreite steigt (vgl. Kollmann 1951). Inwiefern beim Vergleich der Standorte zusätzlich ein Einfluss aufgrund des unterschiedlichen Niederschlags besteht, konnte nicht eruiert werden.

3.2 Messungen an den Biegeproben

Die Ergebnisse der Biegeproben sind in der Tabelle 3 aufgeführt. Das Holz vom Standort Flims erzielt, außer beim Resonanzquotienten und dem logarithmischen Dekrement, die höchsten Werte, gefolgt vom Standort Obersaxen. Dies ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Dichte zurückzuführen.

Die E -Moduln und die Biegefestigkeiten liegen auf Grund der niedrigen Dichte eher im unteren Bereich der in der Literatur angegebenen Werte (Wagenführ 2007). Es ergeben sich jedoch trotzdem hohe Werte für das Verhältnis von E -Modul zu Dichte, was gutes Resonanzholz auszeichnet (Bariska 1978, Holz 1996).

So beträgt das Verhältnis des statischen E -Moduls [N/mm^2] zur Dichte [kg/m^3] für das Holz von Flims 28,1, für Obersaxen 25,5 und für Thusis 24,0 (wassergelagerte) bzw. 23,7 (nicht wassergelagerte Proben). Bei den Standorten von Obersaxen und Thusis zeigen sich deutliche Unterschiede innerhalb der ausgewählten Bäume. So fällt in Obersaxen Baum 4 leicht ab mit einem mittleren Verhältnis von E/ρ von 24 (\rightarrow Bäume 1–3 $E/\rho = 26$). Bei den Proben von Thusis zeigt Baum 4 wegen Schrägfasrigkeit der Proben ein deutlich geringeres Verhältnis auf ($E/\rho = 21,5$ (unbehandelt); $E/\rho = 20,5$ (wassergelagert)) und bei den unbehandelten Proben zusätzlich Baum 3 wegen leichtem

Anteil von Druckholz ($E/\rho = 21,3$). Für die Bäume 1 und 2 bei den unbehandelten Proben ($E/\rho = 26,0$) und die Bäume 1–3 bei den wassergelagerten Proben ($E/\rho = 25,1$) erhöht sich dadurch das Verhältnis von E/ρ in den Bereich der Werte von Obersaxen. Vergleichend haben (Yano et al. 1994) für Resonanzholz aus Sitkafichte einen mittleren Wert von 27,6 erhalten.

Akustisch gesehen ist für Resonanzholz ein hoher Resonanzquotient wünschenswert (Holz 1984). Dieser nimmt mit abnehmender Dichte zu. Dies ist besonders deutlich bei den selektierten Proben in Abb. 1 zu beobachten (s. auch Holz 1973).

Die Dämpfung (logarithmisches Dekrement) lässt keine relevanten Unterschiede zwischen den Standorten erkennen. Die Werte liegen im mittleren Bereich der von Holz (1967) an Fichtenresonanzholz gemessenen Werte. Dieser gibt für den Frequenzbereich von 100–4000 Hz einen Dämpfungsfaktor ($\eta' = \Lambda/\pi$) von 0,0090 bis 0,0125 an. Bei den Messungen von Buksnowitz (2006), ebenfalls an Fichtenresonanzholz, ergab sich dagegen ein leicht höheres durchschnittliches logarithmisches Dekrement (Λ) von 0,04037.

Die aus der Schallgeschwindigkeit berechneten E -Moduln liegen um 34% höher als die mittels statischer Biegeprüfung bestimmten Werte. Dies ist deutlich höher als bei früheren Messungen (18–21%) an nicht für Resonanzholz bestimmten Fichten aus dem Schweizerischen Mittelland ermittelt wurde (Sonderegger und Niemz

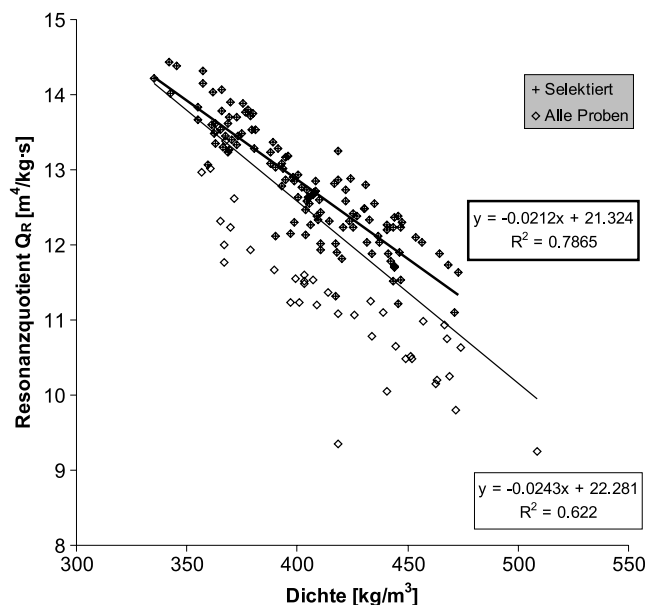


Abb. 1 Abhängigkeit des Resonanzquotienten von der Dichte. Selektiert = Ohne Proben der schlechter klassierten Bäume (Obersaxen: Baum 4, Thusis unbehandelt: Bäume 3+4, Thusis wassergelagert: Baum 4)

Fig. 1 Resonance quotient as a function of density. Selected = Without specimens of the inferior trees (Obersaxen: Tree 4, Thusis untreated: Trees 3+4, Thusis water soaked: Tree 4)

2004). Nach Burmester (1965) ist die gemessene Schallgeschwindigkeit sowohl von der Faserlänge als auch von der Rohdichte abhängig. Die größten Schallgeschwindigkeiten werden dabei in der Übergangszone zwischen Früh- und Spätholz vermutet. Da messtechnisch bedingt, jeweils die schnellsten Schallwellen innerhalb einer Probe gemessen werden und nicht ein Mittelwert, könnten die höheren Werte des Resonanzholzes auf deren geringen Spätholzanteil zurückzuführen sein (Schallgeschwindigkeit höher als aufgrund der niederen Dichte zu erwarten wäre). Die *E*-Moduln, bestimmt aus der Eigenfrequenz, liegen um 8% über den statisch bestimmten Werten. Dies ist in Übereinstimmung mit Werten früherer Arbeiten: Bei Görlacher (1984) ergaben sich vergleichsweise um 9% höhere Werte bei Messungen an Douglasie und bei Niemz et al. (1997) sowie Spycher et al. (2008) um 9% bzw. 10,1% höhere Werte für Fichte.

Der dynamische *E*-Modul korreliert sehr gut mit dem statischen *E*-Modul. Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist mit 0,93 bis 0,99 sehr hoch (Tabelle 4). Dabei ist die Korrelation der aus der Eigenfrequenz bestimmten Werte noch deutlich höher als diejenige der aus der Schallgeschwindigkeit berechneten Werte. Die hohen Korrelationen, welche trotz des geringeren Probenumfangs höher liegen als bei früheren Untersuchungen an unsortiertem Fichtenholz (Sonderegger et al. 2008), weisen auf eine sehr geringe Streuung der Eigenschaften hin, ein Merkmal, welches für Klangholz charakteristisch ist.

Die Bestimmtheitsmaße zwischen Biegefestigkeit und statischem *E*-Modul, Biegefestigkeit und Dichte sowie statischem *E*-Modul und Dichte sind ebenfalls deutlich höher als bei Sonderegger et al. (2008). Bei der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Dichte zeigt sich (außer beim Standort Obersaxen) erst beim Betrachten aller Standorte zusammen eine deutliche Korrelation (Tabelle 4).

Tabelle 4 Bestimmtheitsmaße für ausgewählte lineare Regressionen (gemessen an Biegestäben) sowie Parameter der Regressionsgleichung $y = ax + b$ bezogen auf alle Proben.

Table 4 Coefficient of determination of selected linear regressions (measurements on bending specimens) and parameter of the regression equation $y = ax + b$ referring to all specimens

Korrelationen	Flims	Obersaxen	Bestimmtheitsmaß R^2			Regressionsparameter	
			Thusis unbehandelt	Thusis wassergelagert	Alle zusammen	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>E</i> -Modul (E_F) – <i>E</i> -Modul (E_{DIN})	0,994	0,996	0,993	0,993	0,996	1,069	70,6
<i>E</i> -Modul (E_C) – <i>E</i> -Modul (E_{DIN})	0,971	0,959	0,931	0,956	0,975	1,248	925
<i>E</i> -Modul (E_C) – <i>E</i> -Modul (E_F)	0,981	0,964	0,947	0,968	0,980	1,170	827
Biegefestigkeit – <i>E</i> -Modul (E_{DIN})*	0,815	0,844	0,789	0,85	0,905	0,0055	12,2
Biegefestigkeit – Dichte*	0,808	0,838	0,751	0,853	0,894	0,265	– 35,8
<i>E</i> -Modul (E_{DIN}) – Dichte*	0,621	0,913	0,616	0,683	0,849	44,7	–7311
Schallgeschwindigkeit – Dichte*	0,323	0,733	0,106	0,22	0,59	5,2	3822

* Nur selektierte Proben (ohne Obersaxen: Baum 4, Thusis unbehandelt: Bäume 3 und 4, Thusis wassergelagert: Baum 4)

Tabelle 5 Würfelförmige Proben: Schallgeschwindigkeiten (c_{ij}), Elastizitätsmoduln (*E*) und Schubmoduln (*G*) berechnet aus den Schallgeschwindigkeiten. JR-Br = Jahrringbreite, *i* = Schallausbreitungsrichtung, *j* = Schwingungsrichtung, *L* = longitudinal, *R* = radial, *T* = tangential

Table 5 Cubic specimens: Sound velocities (c_{ij}), MOE (*E*) and shear modulus (*G*) calculated from sound velocities. JR-Br = annual ring width, *i* = direction of wave propagation, *j* = direction of oscillation, *L* = longitudinal, *R* = radial, *T* = tangential

Standort	Anzahl [-]	Feuchte [%]	Dichte [kg/m ³]	JR-Br [mm]	c_{LL} [m/s]	c_{RR} [m/s]	c_{TT} [m/s]	c_{LR} [m/s]	c_{RL} [m/s]	c_{LT} [m/s]
Flims	40	12,6	425 <i>v</i> = 4,7	1,50 <i>v</i> = 28,0	6550 <i>v</i> = 1,5	2220 <i>v</i> = 3,2	1940 <i>v</i> = 2,3	1290 <i>v</i> = 6,1	1310 <i>v</i> = 7,2	1290 <i>v</i> = 5,7
Obersaxen	40	12,7	409 <i>v</i> = 9,6	1,22 <i>v</i> = 37,1	6020 <i>v</i> = 6,3	2240 <i>v</i> = 3,3	1950 <i>v</i> = 3,3	1310 <i>v</i> = 8,9	1370 <i>v</i> = 9,1	1300 <i>v</i> = 8,2
Thusis unbehandelt	40	12,5	389 <i>v</i> = 6,1	1,55 <i>v</i> = 31,4	5930 <i>v</i> = 7,6	2270 <i>v</i> = 2,2	1970 <i>v</i> = 4,2	1320 <i>v</i> = 9,3	1410 <i>v</i> = 9,9	1320 <i>v</i> = 9,7
Thusis wassergelagert	40	12,9	389 <i>v</i> = 9,2	1,58 <i>v</i> = 31,9	5910 <i>v</i> = 7,3	2280 <i>v</i> = 3,6	1970 <i>v</i> = 3,6	1360 <i>v</i> = 10,0	1440 <i>v</i> = 9,6	1340 <i>v</i> = 10,1
Standort	c_{TL} [m/s]	c_{RT} [m/s]	c_{TR} [m/s]	E_L [N/mm ²]	E_R [N/mm ²]	E_T [N/mm ²]	E_L/E_R	$G_{LR=RL}$ [N/mm ²]	$G_{LT=TL}$ [N/mm ²]	$G_{RT=TR}$ [N/mm ²]
Flims	1200 <i>v</i> = 5,4	425 <i>v</i> = 7,1	409 <i>v</i> = 8,3	18200 <i>v</i> = 6,8	2090 <i>v</i> = 5,7	1600 <i>v</i> = 5,8	8,7 <i>v</i> = 7,8	725 <i>v</i> = 12,6	655 <i>v</i> = 8,4	74 <i>v</i> = 13,9
Obersaxen	1230 <i>v</i> = 8,7	446 <i>v</i> = 6,9	445 <i>v</i> = 8,0	14800 <i>v</i> = 12,9	2050 <i>v</i> = 12,9	1560 <i>v</i> = 9,8	7,3 <i>v</i> = 15,3	744 <i>v</i> = 24,8	662 <i>v</i> = 20,7	81 <i>v</i> = 11,9
Thusis unbehandelt	1350 <i>v</i> = 8,2	430 <i>v</i> = 7,4	415 <i>v</i> = 7,5	13800 <i>v</i> = 18,1	2010 <i>v</i> = 7,3	1510 <i>v</i> = 8,7	6,9 <i>v</i> = 17,3	729 <i>v</i> = 15,7	693 <i>v</i> = 13,2	70 <i>v</i> = 14,2
Thusis wassergelagert	1350 <i>v</i> = 6,5	431 <i>v</i> = 6,9	427 <i>v</i> = 5,7	13600 <i>v</i> = 16,1	2020 <i>v</i> = 14,0	1510 <i>v</i> = 12,5	6,8 <i>v</i> = 18,6	774 <i>v</i> = 24,5	712 <i>v</i> = 20,3	72 <i>v</i> = 16,0

Eine Abhängigkeit von der Jahrringbreite konnte jedoch bei keinem der oben genannten Eigenschaften (Festigkeit, E -Modul, Dichte) beobachtet werden. Dies dürfte auf die geringe Streuung der Jahrringbreite zurückzuführen sein.

3.3 Messung der Schallgeschwindigkeiten an würfelförmigen Proben

In Tabelle 5 sind die Schallgeschwindigkeiten und die daraus berechneten E -Moduln und Schubmoduln dargestellt. In Längsrichtung (c_{LL} und E_L) ergeben sich für Flims wesentlich höhere Werte als bei den Standorten Obersaxen und Thusis. In allen anderen Richtungen sind die Unterschiede zwischen den Standorten gering. Die Werte liegen jedoch (außer in Längsrichtung bei Obersaxen und Thusis) deutlich über denjenigen von Keunecke et al. (2007) an durchschnittlichem Fichtenholz aus dem Schweizerischen Mittelland ermittelten Werten. Splintholz und Wasserlagerung haben keinen feststellbaren Einfluss. Die Schallgeschwindigkeit und damit auch der E -Modul in radialer Richtung sind deutlich höher als tangential. Die Verhältnisse von E_L zu E_R liegen standortsabhängig zwischen 6,9 (Thusis), 7,3 (Obersaxen) und 8,7 (Flims). Holz und Kluck (1997a) geben für Resonanzholz ein Verhältnis von unter 15 an.

3.4 Quellung, Schwindung, Sorption

In den Abb. 2 und 3 sind die Quellung und Schwindung in radialer und tangentialer Richtung, gesondert nach Standorten sowie nach Splint- und Kernholz, dargestellt. Dabei sind sowohl die Quell- als auch die Schwindmaße auf

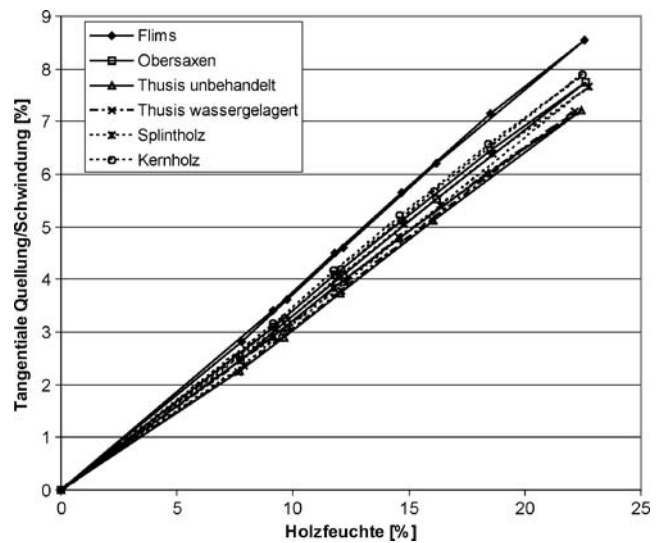


Abb. 3 Tangentielle Quellung und Schwindung in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

Fig. 3 Tangential swelling and shrinkage as a function of moisture content

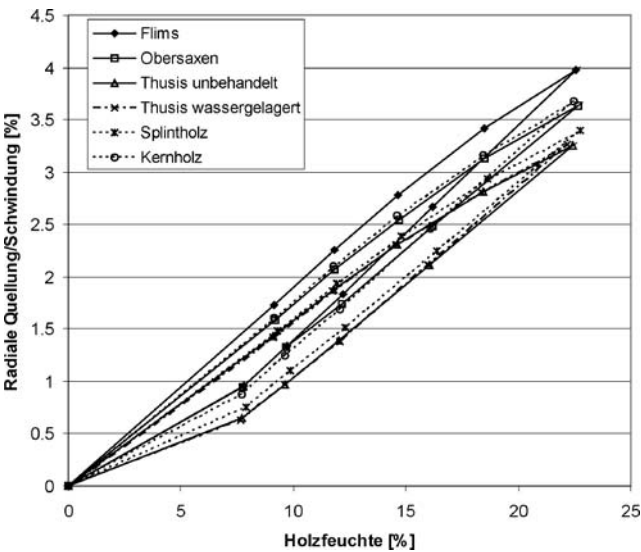


Abb. 2 Radiale Quellung und Schwindung in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

Fig. 2 Radial swelling and shrinkage as a function of moisture content

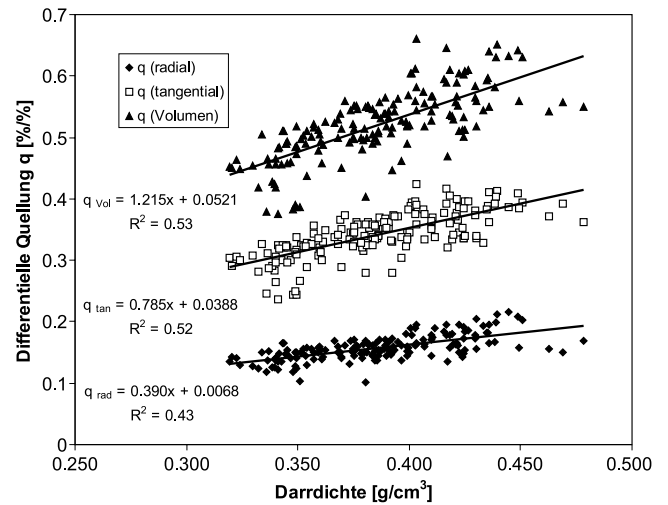


Abb. 4 Differenzielle Quellung in Abhängigkeit von der Dichte

Fig. 4 Differential swelling as a function of density

den Darrzustand bezogen. In radialer Richtung ist im Unterschied zur tangentialen Richtung ein deutlicher Hystereseeffekt aufgrund einer durch die Holzstrahlen bedingten, behinderten Quellung bzw. Schwindung zu erkennen. Es zeigt sich, dass Flims in beiden Richtungen das größte Quell- und Schwindverhalten aufweist. Obersaxen liegt zwischen Flims und Thusis. Das Quell- und Schwindverhalten des Kernholzes liegt leicht über dem des Splintholzes. Die durchgeführte Wasserlagerung beim Standort Thusis hat auf das Quell- und Schwindverhalten keinen Einfluss. Beim Vergleich der Standorte ist eine starke Abhängigkeit von der Dichte festzustellen, was das stärkste Quellverhalten von Flims erklärt. In Abb. 4 ist diese Abhängigkeit an-

Tabelle 6 Einfluss der Wasserlagerung auf den Extraktstoffanteil und den pH-Wert (Mittelwerte aus je 2 Messungen pro Variante) sowie Vergleich mit Literaturdaten
Table 6 Influence of water storage on content of extractives and pH-value (average of 2 measurements per type) and dates from literature by comparison

Probe	Extrakte in Ethanol/Toluol		Extrakte in Heisswasser		Extrakte in Kaltwasser	
	[%]	[%]	pH	[%]	pH	
Kernholz						
Unbehandelt	1,38	0,56	4,81	0,34	5,28	
Wassergelagert	1,36	0,60	4,74	0,34	5,10	
Splintholz						
Unbehandelt	2,22	1,43	4,71	1,13	5,29	
Wassergelagert	0,88	0,33	4,78	0,18	5,10	
Literaturwerte						
Holzatlas: Unbehandelt ¹	0,6–2,3	2,0		1,1–1,4		
Fengel: Unbehandelt	2,0 ³	2,0 ²		1,0 ²		
Fengel: Wassergelagert (17 Jahre) ⁴	1,0	1,7		1,1		

¹ Wagenführ (2007), ² Fengel (1971), ³ Fengel und Przyklenk (1983), ⁴ Fengel und Wegener (1988)

hand der differentiellen Quellung unter Berücksichtigung aller Proben aufgezeigt. Die Werte liegen im Bereich der von Wagenführ (2007) allgemein für Fichte angegebenen Werte.

Die Sorptionsisothermen unterscheiden sich zwischen den Standorten kaum. Auch Splint- und Kernholz sowie die wassergelagerten Proben verhalten sich praktisch gleich. Die Sorptionsisothermen folgen einer typischen Hystereseschleife. Aus den Werten aller Proben ermittelt, lässt sich diese bis zu einer relativen Luftfeuchte von 93% durch die Gl. 6 und 7 mit guter Annäherung beschreiben:

$$\text{Absorption: } y = 3,64 \cdot 10^{-07}x^4 - 1,59 \cdot 10^{-05}x^3 - 0,00239x^2 + 0,308x + 0,000773 \quad (6)$$

$$\text{Desorption: } y = -2,08 \cdot 10^{-07}x^4 + 7,04 \cdot 10^{-05}x^3 - 0,00663x^2 + 0,416x - 0,000697 \quad (7)$$

3.5 Extraktstoffe

Die Extraktstoffanteile sind in Tabelle 6 für den Standort Thusis dargestellt und liegen im Bereich der ebenfalls dort angegebenen Werte aus der Literatur. Es ist erkennbar, dass die Wasserlagerung über eine Zeitspanne von drei Monaten den Extraktstoffanteil nur im Splintholzbereich aufgrund der besseren Wegsamkeit gegenüber Kernholz (Tüpfelverschluss) stark reduziert. Dagegen ist bei Fengel und Wegener (1988) an einem 17 Jahre unter Wasser gelagerten Fichtenstamm im gesamten Bereich (Kern- und Splintholz) eine Reduzierung des Ethanol-Toluol Extrakts feststellbar, vermutlich aufgrund der Einwirkung von Bakterien.

Auf die geprüften Holzeigenschaften hatte die Wasserlagerung keinen erkennbaren Einfluss (s. oben). Dies bestätigen die Aussagen von Feuerstein (1935), welcher dem Auslaugen des Holzes im Wasser zwecks Verbesserung der Holzqualität keine Bedeutung beimisst.

4 Schlussfolgerungen

An allen Standorten konnte Klangholz von guter bis sehr guter Qualität gewonnen werden. Dabei zeigten sich besonders aufgrund der Höhenlage deutliche Unterschiede zwischen den Standorten. So zeichnete sich das Holz von Flims, welches aufgrund seiner tieferen Lage eine höhere Dichte (größerer Spätholzanteil) aufwies, durch deutlich höhere Biegefestigkeit und Steifigkeit in longitudinaler Richtung aus. Die Quell- und Schwindwerte lagen trotz der niederen Dichte des Resonanzholzes, welches tiefere Werte erwarten ließ, im Bereich von durchschnittlichem Fichtenholz. Dagegen ergab sich, durch den sehr homogenen Aufbau des Klangholzes (Jahringbreite etc.) bedingt, bei allen Standorten eine hohe Korrelation zwischen verschiedenen Holzeigenschaften wie z.B. Biegefestigkeit und *E*-Modul. Alle Standorte wiesen ein gutes Verhältnis von *E*-Modul zu Dichte (insbesondere ohne die Proben mit leichtem Druckholz und die schrägfaserigen Proben), einen hohen Resonanzquotienten und ein niedriges Verhältnis von longitudinalem zu radialem *E*-Modul (weit unter dem von Holz und Kluck (1997a) geforderten Wert für Resonanzholz) auf, was alles auf qualitativ sehr gutes Resonanzholz hindeutet. Laut Florinett (mündl. Mitteilung) eignet sich das Holz von Flims aufgrund der hohen Festigkeiten sehr gut für Gitarrendecken. Für Decken von Violinen sollte jedoch die Dichte weniger als 400 kg/m³ betragen, wofür besonders Thusis geeignet erscheint.

Danksagung Die Autoren danken Herrn Andrea Florinett, Tonewood Switzerland, für die Materialbereitstellung und zahlreiche wertvolle Anregungen.

Literatur

Alter P (2007) Untersuchungen zum Einfluss von ausgewählten Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Musikinstrumentenholz. Diplomarbeit, ETH Zürich, Institut für Baustoffe (Gruppe Holzphysik)

- Anonymus (2001) Klangforschung: Das Geheimnis der Stradivari. *Geo Magazin* 4:219–221
- Bariska M (1978) Klangholz, Holzinstrument, Musik. *Naturwissenschaftliche Rundsch* 31(2):45–52
- Bariska M (1996a) Physik der Saiteninstrumente – am Beispiel der Violine. *Schweiz Z Forstwes* 147(9):703–713
- Bariska M (1996b) Zur Geschichte der Holzverwendung beim Musikinstrumentenbau. *Schweiz Z Forstwes* 147(9):683–693
- Brockhaus Enzyklopädie (1970) Bd. 10, 17. Aufl. FA Brockhaus, Wiesbaden, S 223
- Buksnowitz C (2006) Resonance wood of *Picea abies*. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien
- Burmester A (1965) Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und morphologischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz. *Holz Roh- Werkst* 23(6):227–236
- DIN 52184 (1979) Prüfung von Holz. Bestimmung der Quellung und Schwindung. Beuth Verlag, Berlin Köln
- DIN 52186 (1978) Prüfung von Holz. Biegeversuch. Beuth Verlag, Berlin Köln
- Fengel D, Wegener G (1988) Chemische Analysen von Fichtenholz nach 17jähriger Wasserlagerung. *Holz Roh- Werkst* 46:7–8
- Feuerstein A (1935) Das Klangholz. *Forstwiss Cent bl* 617–624
- Friedli F (2000) Nischensortimente erkennen und nutzen. *Schweiz Schreinerztg* 111(8):46
- Görlacher R (1984) Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz. *Holz Roh- Werkst* 42: 219–222
- Holz D (1967) Untersuchungen an Resonanzholz. 3. Mitteilung. *Holztechnologie* 8(4):221–224
- Holz D (1973) Untersuchungen an Resonanzholz. 5. Mitteilung. *Holztechnologie* 14(4):195–202
- Holz D (1984) Über einige Zusammenhänge zwischen forstlich-biologischen und akustischen Eigenschaften von Klangholz (Resonanzholz). *Holztechnologie* 25(1):31–36
- Holz D (1996) Comments on “Chemical treatment of wood for musical instruments”. *J Acoust Soc Am* 99(3):1795–1796
- Holz D, Kluck D (1997a) Einfluss von Faserwinkelabweichungen und Jahrringneigung auf akustisch wichtige Eigenschaften von Resonanzholz. Teil 1. *Holz-Zentbl* 123(37/38):564–566
- Holz D, Kluck D (1997b) Einfluss von Faserwinkelabweichungen und Jahrringneigung auf akustisch wichtige Eigenschaften von Resonanzholz. Teil 2. *Holz-Zentbl* 123(41):594–598
- Holz-Lexikon (2003) 2 Bände, 4. Aufl., DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- Keunecke D, Sonderegger W, Pereteanu K, Lüthi T, Niemz P (2007): Determination of Young’s and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. *Wood Sci Technol* 41:309–327
- Kollmann F (1951) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg
- Krautkrämer J, Krautkrämer H (1986) *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Aufl. Springer Verlag, Berlin
- Lexikon der Holztechnik (1988) 3. Aufl. VEB Fachbuchverlag, Leipzig
- Mette HJ (1984) *Holzkundliche Grundlagen der Forstnutzung*. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- Niemz P (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen
- Niemz P, Kucera LJ, Pöhler E (1997) Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung des dynamischen *E*-Moduls mittels Schall-Laufzeit- und Resonanzfrequenzmessung. *Holzforsch Holzverwert* 49(5):91–93
- Ott E, Frehner M, Frey H-U, Lüscher P (1997) *Gebirgsnadelwälder*. Paul Haupt Verlag, Bern
- Sonderegger W, Niemz P (2004) The influence of compression failure on the bending, impact bending and tensile strength of spruce wood and the evaluation of non-destructive methods for early detection. *Holz Roh- Werkst* 62:335–342
- Sonderegger W, Mandallaz D, Niemz P (2008) An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. *Wood Sci Technol* 42(4):281–298
- Spycher M, Schwarze FWMR, Steiger R (2008) Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties. *Wood Sci Technol* 42(4):325–342
- T 204 cm-97 (1997) Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI TGL 15799/12 (1982) Klangholz, Bootsbauholz, Zündwarenholz. In: *Mitteilungsblatt wissenschaftlich-technischer Fortschritt Forstwirtschaft* 1/82, Sonderheft TGL „Rohholz“, Teil II, Institut für Forstwissenschaften Eberswalde, S 97–103
- Wagenführ R (2007) *Holzatlas*. 6. Aufl. Carl Hanser Verlag, München
- Yano H, Kajita H, Minato K (1994) Chemical treatment of wood for musical instruments. *J Acoust Soc Am* 96(6):3380–3391
- Zimmermann U (1996) Anforderungen an das Klangholz. *Schweiz Z Forstwes* 147:695–702