

Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten

Report**Author(s):**

Krackler, Verena; Keunecke, Daniel; Niemz, Peter

Publication date:

2010-06

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006113078>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

IfB Projektstudie

Verena Krackler, Daniel Keunecke, Peter Niemz

Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten





Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustoffe
Institute for Building Materials

Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten

Verena Krackler, Daniel Keunecke, Peter Niemz

ETH Zürich
Institut für Baustoffe
Holzphysik
Schafmattstrasse 6
8093 Zürich

Zusammenstellung aus den Abschlussberichten
Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz
und
Untersuchungen zur Verwertung von bei Laubholz anfallenden Holzresten

Zürich, 15. Juli 2010

VORWORT

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine Zusammenstellung aus den Recherchen „Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz“ (Teil der Gesamtstudie „Entscheidungsgrundlagen zur Förderung von Laubholzverarbeitung und –absatz“ im Rahmen des Aktionsplanes Holz) und „Untersuchungen zur Verwertung von bei Laubholz anfallenden Holzresten“ (Forschungsbericht des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung). Im Mittelpunkt stehen Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz und Laubholzresten.

Dank gilt an dieser Stelle all jenen, die zum Gelingen des Berichtes beigetragen haben.

Besonders danke ich Prof. Dr. Peter Niemz (ETH Zürich) und Prof. Dr. Andreas Hurst (BFH-AHB Biel) für die fachliche Unterstützung während der Zeit.

Weiterhin danke ich Dr. Hubertus Schmidtke (Silvaconsult AG), Thomas Lüthi und Michael Gautschi (BAFU) für die angenehmen und konstruktiven Projektbesprechungen.

Vielen Dank an Dr. Daniel Keunecke (ETH Zürich) für seine Ratschläge und das Korrekturlesen des Berichts. Ebenso danke ich Melanie Wetzig und Anton Brandmair (beide ETH Zürich) für die Bereitstellung von Untersuchungsergebnissen.

Nachfolgend danke ich folgenden Personen und Unternehmen für ihre Meinungen, Hinweise und Informationen:

Toni Ackermann (HESS & CO. AG Sperrholzfabrik, Döttingen)
Christoph Affentranger (innovation wood, Zug)
Patrick Corbat (A+C Corbat SA, Vendlincourt)
Regina Emmenegger (EGGER Holzwerkstoffe Schweiz GmbH, Kriens)
Christoph Fuhrmann (Fuhrmann Ingenieurbüro für Holzbau, Schwanden bei Brienz)
Michael von der Gathen (Hamberger Flooring GmbH & Co. KG, Rosenheim)
Hans Gisler (Gisler Holzbau, Ganterschwil)
Martin Howald (KRONOSPAN Schweiz AG, Menznau)
Thomas Hübner (A+C Corbat SA, Vendlincourt)
Günter Karbun, (Fritz Egger GmbH & Co., St. Johann in Tirol)
Willy Lang (Holzbau Amann GmbH, Weilheim-Bannholz)
Prof. Bernhard Letsch (BFH-AHB, Biel)
Matthias Oelhafen (Pavatex SA, Cham)
Evelyn Pöhler (SAH c/o Lignum, Zürich)
Jörg Reimer (HWS, Reinach 2)
Manfred Reinkemeier (Abalon Hardwood GmbH, Heiligenkreuz/L.)
Carina Schwab (LFW, Freising)
Thomas Strahm (Neue Holzbau AG, Lungern)
Dr. Udo Seifried (BFH-AHB, Biel)
Prof. Dr. Thomas Stautmeister (BFH-AHB, Biel)
Dr. Oliver Thees (WSL, Birmensdorf)
Prof. Dr. Thomas Volkmer (BFH-AHB, Biel)
Philippe Walther (Girsberger AG, Bützberg)
Sonja Ziegler (TU Dresden)

Abschliessend möchte ich dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die finanzielle Förderung des Projektes danken.

KURZREFERAT

Das dritte und aktuellste schweizerische Forstinventar (LFI) von 2004 bis 2006 bescheinigte für Laubholz eine Vorratssteigerung von 10,4 %. Der Nadelholzvorrat dagegen sank. Obwohl auch andere europäische Länder diese Tendenz aufweisen, wird in der Schweiz der Grossteil (ca. 60 %) des geernteten Laubholzes sogleich energetisch verwertet, ohne es einer vorherigen Nutzung zuzuführen. Neben dem geringeren Stammholzanteil und der schwierigeren Verarbeitung stellt in der Schweiz besonders die nicht geschlossene Wertschöpfungskette vom Rundholz zum Endprodukt ein ausschlaggebendes Problem dar. Für nicht genutzte Sortimente war daher die energetische Verwertung bisher die komfortabelste und lohnendste Lösung.

Neben der Verarbeitung zu Vollholzprodukten und Holzwerkstoffen kann Holz auch stofflich oder chemisch genutzt werden. Im Vollholzbereich besitzt Laubholz mitunter eine lange Tradition (z.B. Dachstühle, Treppen, Möbel, Fussböden oder Innenausbauten). Für einige Holzwerkstoffe wie Massivholzplatten und Sperrholz sind Laubhölzer ebenso üblich. Zahlreiche Forschungsprojekte und -berichte bestätigen jedoch auch in Nadelholzdomänen einen Laubholzeinsatz. Dazu gehören Spanplatten, OSB, MDF sowie Holzwerkstoffe für den tragenden Bereich wie Brettschichtholz, Duo- und Triobalken. Bestehende Normen hindern Hersteller allerdings im Moment noch an einer wirtschaftlichen Umsetzung. Ein erster Schritt in die richtige Richtung fand im Oktober 2009 in Deutschland statt, als Brettschichtholz aus Buche die bauaufsichtliche Zulassung für tragende Zwecke im Innenbereich erhielt. Um neue Absatzkanäle neben der energetischen Nutzung entwickeln zu können, ist der Aufbau einer weiterverarbeitenden Industrie in der Schweiz unumgänglich. Das garantiert die inländische Produktion von Halb- und Endfabrikaten und keine Umwege über das Ausland.

ABSTRACT

One crucial result of the recent Swiss National Forest Inventory (NFI) from 2004-2006 is a volume increase of 10.4 % for hardwood. The softwood volume, in contrast, has decreased. Although other European countries confirm this tendency, Switzerland still uses the bulk (ca. 60 %) of the harvested hardwood directly for energetic purposes instead of adding value on it by other applications. Besides the lower percentage of stem wood and the more complicated processing, the main problem in Switzerland is that the value chain from the round timber to an end product is not complete. Therefore the energetic use was and still is the most comfortable and profitable solution for unused assortments.

Hardwood use is possible in the form of solid wood and wood composites, but it can even be used as a substance or chemical product. As a solid wood, hardwood has a long tradition (e.g., roof structures, stairs, furniture, flooring). Today, it is also employed for wood based materials (solid wood panels, plywood). Scientific analyses reveal that hardwoods nowadays even enter softwood domains such as particle boards, medium density fibreboards, oriented strand boards and structural timber (glued laminated timber, Duo/Trio beams). At the moment, manufacturers are restrained regarding the commercial production due to current standards or failing design bases. In the pulp production, domestic hardwood is more and more repressed as usage of fast-growing plantation lumber increases. To develop marketing channels away from energetic use, it is mainly necessary to build a processing industry in Switzerland. Semi-finished or finished goods should be produced on Swiss terrain and not imported from abroad.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG/ZIELSTELLUNG	11
2 EIGENSCHAFTEN UND VERARBEITUNG VON LAUBHOLZ.....	12
2.1 CHARAKTERISIERUNG DES LAUBHOLZES UND DESSEN VERARBEITUNG.....	12
2.1.1 Anatomischer Aufbau von Laubholz.....	12
2.1.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften von Laubholz	12
2.1.3 Spannungen/Wuchsspannungen	13
2.1.4 Verklebung von Laubholz	14
2.1.5 Güteklassen von Laubholz.....	18
2.1.6 Sortierung von Laubholz	19
2.1.7 Aktuelle Normensituation im Holzbau	22
2.2 SORTIMENTE DES LAUBHOLZES VOM WALD BIS ZUM EINSCHNITT	23
2.2.1 Holzsortimente nach der Holzernte	23
2.2.2 Rundholzsortimente für die Schnittholz- und Furniererzeugung.....	25
2.2.3 Sortimente des Abfallholzes	25
2.2.4 Schnitt- und Restholzsortimente aus dem Sägewerk.....	26
2.2.5 Schnittholzausbeute	27
2.2.6 Vergleich der Schweizer Holzsortimente mit Deutschland und Österreich	28
2.3 VERARBEITUNGSTECHNOLOGIE VON LAUBHOLZ IM SÄGEWERK	29
2.3.1 Laubholzbedingte Einflüsse auf die Verarbeitung.....	29
2.3.2 Schnitterzeugnisse und Maschinen.....	30
2.3.3 Einschnittarten für Laubrundholz	31
2.3.4 Einschnittleistung und Schnittkapazität.....	32
2.3.5 Möglichkeiten zur Optimierung der Verarbeitungstechnologie	34
2.4 STRUKTUR DER SÄGE-, ZELLSTOFF- UND HOLZWERKSTOFFINDUSTRIE.....	37
2.4.1 Derzeitige wirtschaftliche Situation	37
2.4.2 Grösse und Kapazitäten von Laubholzsägewerken	37
2.4.3 Verarbeitungs- und Kapazitätsmengen der Zellstoff- und Holzwerkstoffindustrie.....	39
3 VERWENDUNGSMÖGLICHKEITEN	41
3.1 VOLLHOLZPRODUKTE	41
3.1.1 Holz- und Ingenieurholzbau	41
3.1.2 Gartenbau.....	53
3.1.3 Innenausbau	54
3.1.4 Möbelbau	56
3.1.5 Sargbau	59
3.1.6 Mykoholz.....	60
3.1.7 Weitere Verwendungsmöglichkeiten für Laubvollholz.....	62
3.2 HOLZWERKSTOFFE	64
3.2.1 Vollholzwerkstoffe	64
3.2.2 Lagenwerkstoffe	72
3.2.3 Spanwerkstoffe	80
3.2.4 Faserwerkstoffe	89
3.2.5 Leichtbauwerkstoffe	98
3.3 VERWENDUNG DES HOLZES NACH MODIFIZIERUNG.....	98
3.3.1 Ziele der Modifizierung.....	98
3.3.2 Modifizierungsverfahren	99
3.3.3 Nähere Beschreibung einiger Verfahren.....	101
3.4 ZUSATZDIENSTLEISTUNGEN UND KOPPELPRODUKTE	110
3.4.1 Stoffliche Verwertung neben Holzwerkstoffen	110
3.4.2 Chemische Holzverwertung.....	115
3.4.3 Holz als Energieträger	122

3.5 TABELLARISCHER ÜBERBLICK ÜBER DIE VERWENDUNGSMÖGLICHKEITEN.....	129
4 SCHLUSSFOLGERUNG/WEGE AUS DER KRISE.....	131
4.1 OPTIONEN DER FORSTWIRTSCHAFT	131
4.2 OPTIONEN DER SÄGE- UND HOLZINDUSTRIE	132
4.3 POLITISCHE MASSNAHMEN.....	133
5 ZUSAMMENFASSUNG.....	135
6 LITERATURVERZEICHNIS	138
7 TABELLENVERZEICHNIS	149
8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	152

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

A	Österreich
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
atro	absolut-trocken
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BFH-AHB	Berner Fachhochschule-Architektur Holz und Bau
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
BtL	Biomass to Liquid
BWI	Bundeswaldinventur
CEPI	Confederation of European Paper Industries
CH	Schweiz
CN	Cellulosenitrat
CO ₂	Kohlendioxid
CSL	Constructive Strand Lumber
D	Deutschland
DIBt	Deutsches Institut für Baustoffe
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FAOSTAT	Food And Agriculture Organization Of The United Nations
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GKV	Grenzwerteverordnung
HB	Harte Platten
HWL-Platte	Holzwoleleichtbauplatte
kg/m ³	Kilogramm je Kubikmeter
kWh	Kilowattstunde
LFI	Landesforstinventar
lutro	lufttrocken
LVL	Laminated Veneer Lumber (Furnierschichtholz)
m	Meter
MB	mittelharte Platten
MBH	Mittelharte Platten hoher Dichte

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

MBL	Mittelharte Platten geringer Dichte
mm	Millimeter
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MPa	Megapascal
MUF	Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz
NFK	naturfaserverstärkten Kunststoffe
ÖWI	Österreichische Waldinventur
PRF	Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Harz
PSI	Paul-Scherrer-Institut
PSL	Parallel Strand Lumber (Furnierstreifenholz)
PVAC	Polyvinylacetat-Dispersionsklebstoff
PUR	Polyurethanklebstoff
SB	Poröse Platten
SECO	Staatssekretariat für Wirtschaft
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein (Herausgeber von Normen der Baubranche)
SFH	Schweizerische Fachgemeinschaft für Holzleimbau
SNG	synthetischen Erdgases
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1 EINLEITUNG/ZIELSTELLUNG

Holz ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen der Menschheit. Es wird weltweit für Bauten, Werkstoffe, stoffliche oder chemische Produkte genutzt. Als Energiequelle ist es für einige Bevölkerungsgruppen ein lebensnotwendiger Bestandteil. Die Aufrechterhaltung eines ausgewogenen Gleichgewichts zwischen nachwachsendem Vorrat und Verwertung wird durch eine nachhaltige Forstwirtschaft sichergestellt. Vor allem eine grosse Biodiversität unter den Nadel- und Laubbaumarten gewährleistet neben einem intakten Ökosystem eine höhere Flexibilität bei der Holz Auswahl infolge schädigender Naturereignisse. Dies kann jedoch dadurch gefährdet werden, wenn ein Grossteil der Holzindustrie auf Nadelholz fixiert ist und Laubholz zu wenig Chancen zur Etablierung ermöglicht, obwohl die Waldbestandeszahlen eine andere Aussage treffen. Damit kann in aller Kürze die Situation der Schweizer Holzindustrie umschrieben werden, zahlenmässig unterstützt durch das dritte und aktuellste Landesforstinventar (LFI) von 2004 bis 2006. Eine Ausrichtung auf die Fichte als Rohstoff und die verheerende Zerstörung der Monokulturen durch Stürme verursachte eine Abnahme des Vorrats seit dem zweiten LFI (1993-1995) um 7,55 Mio.m³. Der gesamte Nadelholzvorrat sank um immerhin 2,40 Mio.m³. Laubholz dagegen verzeichnete eine Vorratssteigerung von 11,96 Mio.m³, wobei die Buche mit 4,28 Mio.m³ am deutlichsten zunahm (Tabelle 1.1).

Tab. 1.1: Vorratsveränderung der Gesamtschweiz zwischen LFI 2 und LFI 3 pro Produktionsregion des gemeinsamen zugänglichen Waldes ohne Gebüschwald (Brändli 2010)

Vorratsver- änderung	Nadelholz						
	Fichte	Tanne	Föhre	Lärche	Arve	übrige	total
[Mio.m ³]	-7,55	2,96	-0,55	2,13	0,20	0,42	-2,40
[%]	-4,1	5,2	-4,1	11,0	9,2	41,5	-0,9
Vorratsver- änderung	Laubholz						
	Buche	Ahorn	Esche	Eiche	Kastanie	übrige	total
[Mio.m ³]	4,28	2,06	2,87	0,59	0,18	1,98	11,96
[%]	6,2	21,8	24,4	7,1	3,8	18,0	10,4

Trotz dieser positiven Bestandeszahlen für Laubholz durchläuft dessen Verarbeitung eine Krise. Nicht die eigentliche Nutzung ist das ausschlaggebende Problem, sondern die Verteilung auf die drei Sortimente nach der Holzernte. Beinahe 60 % des geernteten Laubholzes werden sogleich energetisch genutzt, ohne das Holz einer vorherigen Nutzung zuzuführen. Hauptgründe dafür sind fehlende Absatzmärkte und eine nicht geschlossene Wertschöpfungskette vom Rundholz zum Halb- oder Fertigprodukt.

Um diesen Zustand zu ändern, bedarf es zunächst Analysen, Umfragen und Studien, später sind auch Umsetzungsprogramme und Forschungsprojekte erforderlich. Das Ziel dieser Recherche ist eine umfassende Charakterisierung und Bestandsaufnahme des Laubholzes in Hinblick auf seine Eigenschaften, Verarbeitung und Verwendungsmöglichkeiten auf der Basis von wissenschaftlichen Publikationen, Produktbeschreibungen, Firmenaussagen und Fachliteratur. Die Unterteilungen in Kategorien bietet dem Leser einen schnellen Überblick über die Vielfalt der Einsatzgebiete. Die abschliessend aufgeführten Vorschläge für Wege aus der Krise sollen den Betroffenen als strategische Entscheidungshilfe dienen.

2 EIGENSCHAFTEN UND VERARBEITUNG VON LAUBHOLZ

2.1 Charakterisierung des Laubholzes und dessen Verarbeitung

2.1.1 Anatomischer Aufbau von Laubholz

Grundsätzlich werden die drei Hauptfunktionen des Baumes (Wasserleitung, Stoffspeicherung, Festigung) durch die drei Hauptgewebearten (Leitgewebe, Speichergewebe, Festigungsgewebe) bewerkstelligt. Nebengewebearten wie das Sondergewebe bei Reaktionsholz oder Exkretgewebe für Harzkanäle sind nicht immer vorhanden. In den drei Hauptschnittrichtungen des Holzes (Quer-, Tangential- und Radialschnitt) sind Aufbau, Anordnung und Form des Gewebes gut sichtbar. Besonders der Querschnitt erlaubt eine aussagekräftige holzanatomische Charakterisierung. Von aussen nach innen besteht der Baum aus Rinde, Bast, Kambium, Splintholz, Kernholz und der Markröhre. Splint- und Kernholz setzen sich aus Jahrringen, den aus Früh- und Spätholz bestehenden Zuwachsschichten des Baumes, zusammen. Die zu Beginn der Vegetationsperiode gebildeten Zellen des Frühholzes sind weitlumig und dünnwandig und dienen vor allem der Wasserleitung. Gegen Ende der Vegetationsperiode wird das Spätholz aus englumigen und dickwandigen Zellen erzeugt, dessen Hauptaufgabe die mechanische Stabilisierung des Baumes ist. Laubhölzer unterscheiden sich deutlich von den entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelhölzern. Ihr Aufbau ist differenzierter, da Funktionen und Aufgaben auf mehrere Zelltypen aufgeteilt werden. Das hat zur Folge, dass Parameter, Maschinen und Verfahren der Be- und Verarbeitung unter Umständen angepasst werden müssen. In Tabelle 2.1 werden die wichtigsten anatomischen Unterschiede zwischen Nadel- und Laubhölzern zusammengefasst.

Tab. 2.1: Zelltypen von Nadel- und Laubhölzern (Wagenführ und Scholz 2008)

Nadelholz		Zelltyp	Laubholz	
Funktion				Funktion
Wasserleitung	Frühholz-	Tracheiden	Gefäß- und vasizentrische ...	Wasserleitung
Festigung	Spätholz-		Faser-	Festigung
Wasserleitung	Holzstrahl-			
Speicherung	Holzstrahlparenchym			Speicherung
Speicherung	Längsparenchym			Speicherung
Harzausscheidung	Epithelzellen der Harzkanäle		/	/
/	/	Gefässe/ Tracheen/ Poren		Wasserleitung
/	/	Libriformfasern		Festigung

2.1.2 Physikalisch-mechanische Eigenschaften von Laubholz

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick zur Mechanik, Dimensions- und Formstabilität, Dauerhaftigkeit, Bearbeitbarkeit und Beleimung von Fichte, Weisstanne, Buche, Eiche und Esche; den bedeutendsten Schweizer Nadel- und Laubholzarten.

Tab. 2-2: Eigenschaften von Fichte, Weisstanne, Buche, Eiche und Esche (Sell und Holz 1997; Bernasconi 2004)

Eigenschaft	Holzart				
	Fichte	Weisstanne	Buche	Eiche	Esche
Rohdichte lufttrocken [kg/m ³]	430...470	430...480	700...790	650...760	680...760
Druckfestigkeit σ_{BII} [N/mm ²]	40...50	40...52	52...64	52...64	43...59
Zugfestigkeit σ_{ZBII} [N/mm ²]	80...90	80...93	100...135	88...110	130...160
Biegefestigkeit σ_{bBII} [N/mm ²]	65...77	62...74	90...125	86...108	100...127
Scherfestigkeit τ_{BII} [N/mm ²]	5,0...7,5	4,9...7,5	7,7...10,0	9,3...11,5	12,0...13,4
E-Modul aus Biegeversuch E_{II} [N/mm ²]	10.000... 12.000	10.000... 14.500	12.300... 16.400	10.500... 14.500	11.900... 13.900
Dimensions- und Formstabilität	gut	gut	gering	mittel	mittel
Natürliche Dauerhaftigkeit	wenig	wenig	nicht	dauerhaft	nicht
Bearbeitbarkeit	sehr gut	sehr gut	leicht	gut	gut
Trocknung	sehr gut	sehr gut	langsam, da neigt zum Werfen u. Reissen, aber technisch sehr gut	befriedigend, nur mit grossem Aufwand technisch möglich	befriedigend, neigt zum Werfen und Reissen
Verleimung	problemlos	problemlos	nach Trocknung problemlos	befriedigend (Gerbsäure und Trocknung)	problemlos

Die drei Laubhölzer weisen deutlich bessere mechanischen Eigenschaften auf als die Nadelhölzer. Als nachteilig erweisen sich die schlechtere Dimensions- und Formstabilität, die kompliziertere und damit aufwendigere Trocknung sowie die z.T. schwierigere Verklebung. Gerade dies führt zu einer erschwerten Verarbeitung und wird daher von vielen Sägern als Grund genannt, Laubholz nicht in grossen Massstab einzuschneiden.

2.1.3 Spannungen/Wuchsspannungen

Auch ohne den Einfluss äusserer Belastungen kann es im Holz zu Spannungen kommen. Die so genannten Eigenspannungen sind eine Folge von nicht über den Querschnitt verteilten Dehnungen und Kontraktionen. Im lebenden Baum befinden sich diese Spannungen in einem Gleichgewicht. Mit der Fällung jedoch verschiebt sich dieses Kräftegleichgewicht und setzt Spannungen frei, die mitunter so gross sein können, dass das Holz bricht oder reisst. Die Buche ist besonders von Querkzug- und Längsspannungen betroffen. Querkzugspannungen entstehen aus Druckspannungen im äusseren Stammbereich in tangentialer Richtung, Zugspannungen in Marknähe ebenfalls in tangentialer Richtung. Längsspannungen verhalten sich genau umgekehrt. Längszugspannungen in den rindennahen und Längsdruckspannungen in den marknahen Holzschichten bewirken nach der Auftrennung, dass sich das Holz der äusseren Bereiche verkürzt und das der inneren Schichten verlängert. Der Grund liegt darin, dass sich die vom Kambium gebildeten Zellen etwas zusammenziehen und folglich die einzelnen Zellschichten unter einer Längsspannung angelegt werden. Auf den inneren

Holzbereich wird damit ein Längsdruck ausgeübt. Wird der Stamm gefällt, gleichen sich die Spannungen aus, was wie bei der Buche zu starker Rissbildung führen kann.

Eigenstressungen im Schnittholz oder in Holzwerkstoffen werden durch im Querschnitt auftretende Feuchte- oder sonstige Eigenschaftsprofile verursacht. Feuchteprofile bewirken ein ungleichmässiges Quell- und Schwindverhalten bei der Holz Trocknung und verursachen ein von Trocknungsdauer und Trocknungsgeschwindigkeit beeinflusstes Trocknungsgefälle. Zu Beginn der Trocknung treten nach Trübswetter (2006) zunächst Schwindzugspannungen in den trockenen, oberflächennahen und Druckspannungen in den noch feuchten inneren Holzschichten auf. Beginnt der innere Bereich ebenfalls zu trocknen, kommt es zur Spannungsumkehr und damit zu einem vorübergehenden Spannungsgleichgewicht, das gegen Ende des Trocknungsprozesses aufgrund von Zugspannungen in den inneren Holzschichten wieder aufgehoben wird. Hohe Elastizitätsmodule und unterschiedliche Quell- und Schwindmassen in den drei Hauptschnittrichtungen begünstigen die Rissbildung. Daher neigen Hartlaubhölzer wie Eiche, Buche und Esche besonders zum Werfen und Reissen. Vermindert werden kann dies durch einen langsamen und sanften Trocknungsprozess, der aber länger dauert und damit einen mengenmässig kleineren Output als bei leicht zu trocknenden Holzarten wie Fichte und Kiefer bedeutet.



Abb. 2-1: Rissbildung in Buche durch Eigenstressungen (Autorenkollektiv 2001)

2.1.4 Verklebung von Laubholz

Als problematisch erweist sich zurzeit noch die Verklebung von Laubholz für den tragenden Bereich. Gerade jedoch für die Herstellung von z.B. Brettschichtholzträgern (BSH) sind hochwertige Verklebungen der Keilzinken sowie der Lamellen untereinander Voraussetzung. Zu deren Gewährleistung fehlen dem Technologen nötige Bemessungsgrundlagen. Daher ist es nicht verwunderlich, dass zu dieser Thematik immer wieder Projekte lanciert werden. Generell stehen zur Verklebung von Laubhölzern die gleichen Klebstoffe zur Verfügung wie für Nadelholz. Eine Umfrage unter BSH-Herstellern in der Schweiz, in Deutschland und in Österreich ergab, dass 51 % der befragten Unternehmen melaminhaltige Klebstoffe (MUF/MF), 35 % Polyurethanklebstoffe (PUR) und 9 % resorcinhaltige Klebstoffe (RF/PRF) einsetzen (Ohnesorge et al. 2009). Allerdings erfordern Struktur und Inhaltsstoffe des Laubholzes andere Verklebungsparameter, um zu einer langfristigen Klebfugenbeständigkeit zu führen. Die Hersteller bemängelten eine erschwerte Keilzinkenverklebung sowie einen hohen Werkzeugverschleiss und Verarbeitungsaufwand. Klebstoffsysteme müssten daher auf Laubholz konzipiert werden; Voraussetzung dafür wären jedoch geeignete Prüfverfahren, die es noch zu entwickeln gilt. Untersuchungen zur Laubholzverklebung werden durchgeführt, seit ein Interesse daran besteht, Laubholz für tragende Elemente einzusetzen. Egner und Kolb (1966) prüften bereits die Verleimbarkeit von Buchenelementen und waren der Ansicht, dass sich Bauteile einwandfrei mit den damals im Leimbau eingesetzten Klebstoffen herstellen lassen.

Orientierende Untersuchungen zu BSH aus Eiche, Robinie, Esche und Pappel führten Frühwald et al. (2003b) durch. Ergebnisse von Scherversuchen deuten auf unproblematische Verklebungen der Lamellen zur Übertragung von Schubspannungen hin. Bedenken äusserten die Autoren bezüglich der Delaminierungsprüfungen, da keine Probe den festgelegten Grenzwert von 4 % einhielt. Bernasconi (2004) gibt einen Überblick über die Verleimbarkeit verschiedener Laubhölzer. Die in mehreren Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sind zum Teil in Tabelle 2.1.2 „Eigenschaften von Fichte, Weisstanne, Buche, Eiche und Esche“ zusammengestellt. Aufgrund höherer Quellmasse und Elastizitätsmoduln kann Feuchte im Laubholz zu Spannungen führen. Plattenwerkstoffe wie Laubmassivholzplatten, bei denen der Aufbau asymmetrisch ist oder deren Plattenschichten unterschiedliche Quell- und Schwindmasse aufweisen, können sich durch wechselnde Klimabedingungen verziehen. Inwieweit diese Spannungen durch Variation des Klebstoffes und der Fugendicke kompensiert werden können, untersuchte Wetzig (2009) an dreischichtigen Massivholzplatten aus Buche und Esche, zum Teil mit Fichte kombiniert. Diese wurden mit zwei unterschiedlichen Einkomponenten-PUR (1K-PUR) verklebt. Die Fugendicken betragen 0,1 mm, 1 mm und 2 mm. Künstliche Bewitterung und optische Dehnungsmessung wurden eingesetzt, um Eigenspannung, freie Quellung und Rissentwicklung zu untersuchen. Es zeigte sich, dass die Fugendicken sowie die Elastizität eines Klebstoffes das Verhalten dreischichtiger Platten beeinflussen. Klebstoffe mit hohen E-Moduln behindern das Arbeiten der Deckschichten. Die entstehenden Spannungen können Risse in den Deckschichten hervorrufen. Derartige Eigenspannungen konnten mit zunehmender Fugendicke und unter Verwendung elastischer Klebstoffe beinahe vollständig aufgehoben werden, da die Deckschichten annähernd frei arbeiten konnten. Die dünnsten Klebstofffugen dagegen konnten Schwindspannungen während der künstlichen Bewitterung nicht aufnehmen, was zu erheblichen Delaminierungen führte.

Besonders der Feuchteinfluss bestimmt die Qualität verklebter Laubhölzer massgeblich. Die entstehenden Auswirkung untersuchen derzeit Brandmair et al. (2010). Dafür wurden an verklebten Proben aus Esche, Buche und Eiche die Zugscher- (nach DIN EN 302-1 (2004)) und Druckscherfestigkeiten (nach ASTM D 2559-04 (2004)) nach Lagerung im Normalklima (20 °C, 65 % relative Luftfeuchte) oder nach Kochwasserbehandlung (6 h Kochen + 2 h Tauchen in Wasser mit 20 °C) untersucht. Als Klebstoffe dienten verschiedene industrielle 1K-PUR mit unterschiedlichen E-Moduln sowie als Referenz ein kommerzieller Phenol-Resorcin-Formaldehyd- (PRF) Klebstoff (Tabelle 2-3).

Tab. 2-3: Klebstoffe und Holzarten für Untersuchungen an verschiedenen 1K-PUR-Klebstoffen (Brandmair et al. 2010)

Materialien		
Klebstoff	E-Modul [MPa]	Holzarten
1K-PUR (Dichtstoff):	0,86 ± 0,05	Esche, Buche, Eiche
1K-PUR (Klebstoff für verschiedene Materialien)	162 ± 22,6	
1K-PUR (Klebstoff für Holz)	1180 ± 158	
1K-PUR (Klebstoff für Holz)	3520 ± 306	
1K-PUR (Klebstoff für Holz)	3870 ± 240	
Phenol-Resorcin-Formaldehyd- (PRF)		

Normalklima: Die nach DIN EN 302-1 geforderte Zugscherfestigkeit von mindestens 10 MPa erreichten alle drei Holzarten verklebt mit dem PRF, 1K-PUR 1180 MPa, 1K-PUR 3520 MPa. Der 1K-PUR 3870 MPa erfüllte die Anforderungen mit Esche und Buche, mit Eiche dagegen nicht. Die mittleren Zugscherfestigkeiten des 1K-PUR 162 MPa und 1K-PUR

0,86 MPa waren unter 10 MPa und beim zuletzt genannten am geringsten. Anforderungen an die Druckscherfestigkeit nach ASTM D 2559-04 werden erfüllt, wenn der Wert 90 % des gleichen unverklebten Vollholzes beträgt. Aufgrund eines hohen Wertes von 13,3 MPa für Esche Vollholz, erfüllte keiner der Klebstoffe die Anforderungen. Buche und Eiche Vollholz wiesen Druckscherfestigkeiten von 10,4 bzw. 10,3 MPa auf. Innerhalb der 90 % lagen die Kombinationen Eiche mit 1K-PUR 3520 MPa sowie Eiche bzw. Buche mit 1K-PUR 3870 MPa).

Kochwasserlagerung: Die gekochten und wasserbehandelten Proben zeigten nochmals geringere Druckscherfestigkeiten als die im Normalklima gelagerten. Ausser bei den mit PRF verklebten Proben wiesen Buche und Esche einen höheren Holzbruch auf.

Allgemein konnte die Annahme nicht bestätigt werden, dass Klebstoffe mit niedrigerem E-Modul besser für die Aufnahme des Quell- und Schwindverhaltens des Holzes geeignet sind. Die beiden Klebstoffe 1K-PUR 0,86 MPa und 1K-PUR 162 MPa erfüllten nach der Normalklimaanwendung nicht die Anforderungen an die Druckscherfestigkeit und den Holzbruch. Der Verlust an Druckscherfestigkeit infolge der Kochwasserbehandlung war höher als bei den anderen Klebstoffen. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Zug- und Druckscherfestigkeiten signifikant von Klebstoff- und Holzart beeinflusst werden. Die Tauglichkeit von Holz-Klebstoff-Kombinationen sollte daher immer unabhängig voneinander geprüft werden.

Von besonderem Interesse ist die Verklebung rotkerniger Buche, deren Absatz sich noch immer als schwierig erweist. Rotkernbildung tritt vermehrt im Alter von 90 – 140 Jahren auf. Da bisher das Potential der Buche nicht voll genutzt wird, die Bäume daher zunehmend älter werden und zudem die Zahlen des aktuellen Landesforstinventars auf einen steigenden Vorrat deuten, ist demnach auch mit einem vermehrten Anteil an Rotkern zu rechnen.

Eine umfassende Studie mit dem Titel „Rotkerniges Buchenholz – Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten“ führte die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) im Zeitraum Februar 2003 bis Januar 2004 durch. Neben Prüfungen zur Festigkeit, Farbbeständigkeit, Quellung und Schwindung widmete sich die EMPA auch der Frage, inwieweit die phenolischen Inhaltsstoffe die Verklebung negativ beeinflussen. Dazu wurden ein Polyvinylacetat-Dispersions- (PVAC), ein 1K-PUR sowie ein Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz (MUF) eingesetzt. Proben aus rotkerniger und nicht rotkerniger Buche mit dünnen Klebstoffugen wurden entweder bei einfachen (7 Tage bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte) oder verschärften Prüfbedingungen (6 h kochendes Wasser + 2 h Tauchen in Wasser mit 20 °C, Prüfung im feuchten Zustand) gelagert und anschliessend einer Zugscherprüfung unterzogen. Es zeigte sich, dass der Rotkern die Prüfergebnisse nicht beeinflusst und in der Gesamtheit betrachtet der nicht rotkernigen Buche gleichrangig ist. Die Zugscherfestigkeiten waren bei rotkernigen Proben z.T. höher, im verschärften Klima bei den mit PVAC und 1K-PUR, im einfachen Klima bei den mit MUF verklebten Proben sogar signifikant. Als Grund wird die im Mittel höhere Rohdichte des Buchenholzes vermutet (Pöhler et al. 2004).

Aicher und Reinhardt (2007) untersuchten, ob die zur Klebfugenbeständigkeit durchgeführten Delaminierungsprüfungen für Nadelholz sich auf die Verklebung von Buche mit rotkernigen Anteilen übertragen lassen. Sie dienen der Eignungsprüfung der Klebstoffe für Anwendungen im tragenden Bereich sowie zur Überwachung der Verklebungsqualität bei der Herstellung von Holzbauelementen. Grundsätzlich werden die Proben bei der Prüfung abwechselnd einem oder mehreren Bewässerungs- und Trocknungszyklen ausgesetzt, die aufgrund einwirkender Zug- und Schubspannungen zur Delaminierung der Klebfugen führen können. Dabei werden für tragende Holzbauteile die Klebstofftypen I und II unterschieden, die je nach Einsatzgebiet

und Umgebungsbedingungen unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Für jeden Klebstofftyp existiert ein eigenes Prüfverfahren. Es wurden Proben präpariert, die entweder aus rotkerniger oder nicht rotkerniger Buche sowie aus beiden bestanden. Als Klebstoffe kamen ein 2K-Melamin-Harnstoff-Formalehyd- (MUF-) und ein 1K-PUR Klebstoff zum Einsatz, die beide nachweislich alle Anforderungen an den Klebstofftyp I erfüllen. Aus den Ergebnissen ging hervor, dass die Rotkernigkeit eines oder beider Fügeteile keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit hat. Alle Werte waren so hoch, dass sie die Anforderungen an BSH erfüllt hätten. Anders sah es bei den Delaminierungsprüfungen aus: nichtrotkernige Lamellen erreichten die Anforderungen an die Klebfugenbeständigkeit des Klebstofftyps II, Fugen zwischen zwei rotkernigen Lamellen dagegen wiesen sehr hohe Delaminierungen mit Prozentsätzen über 50 % auf. Die Autoren deuten mit diesen Resultaten auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen sowie die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren und Anforderungen hin.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse beschäftigten sich Schmidt et al. (2009) ebenso mit der Eignung von MUF- und PUR-Klebstoffsystemen für nicht und rotkernige Buche im tragenden Holzbau unter Anpassung der Verklebungsparameter. Delaminierungs- und Scherprüfung wurden gemäss europäischen Normen durchgeführt. Die 38 kleinformatigen BSH-Träger setzten sich aus jeweils sechs 30 mm dicken und 500 mm langen Lamellen zusammen. Es zeigte sich, dass durch Anpassung der Verklebungsparameter entsprechend vorausgehender Untersuchungen für Buche eine hohe Delaminierungsbeständigkeit erreichbar ist. Vor allem die beiden MUF-Systeme zeigten einen Rückgang der Delaminierung durch Erhöhung der geschlossenen Wartezeiten auf 30-75 Minuten. Die Verklebung rotkerniger Buche war mit MUF-1 problemlos möglich. Weniger geeignet war das PU-System; die Fugenbeständigkeit war gering, die Delaminierung sehr hoch. Die äusserst positiven Ergebnisse bei den mit MUF verklebten Lamellen veranlassten die Autoren, einen Antrag auf Erteilung einer bauaufsichtlichen Zulassung für BSH aus Buche zu stellen, womit die Nutzung für tragende Zwecke im Innenbereich möglich wäre. Diese wurde schliesslich Oktober 2009 erteilt (siehe Abschnitt 2.17).

Auch Ohnesorge (2009) untersuchte die Einflussgrössen auf die Verklebungsqualität von BSH aus Buche. Die dreiteilige Studie befasst sich mit der Verklebbarkeit rotkerniger Buche, der Schubfestigkeit und der Klebfugenbeständigkeit von BSH aus Buche. Insgesamt wurden dafür 32 Stämme, von denen 4 gedämpft waren, zu 600 Lamellen mit einem Querschnitt von 130 x 45 mm und einer Länge von 1,20 – 4,30 m aufgeschnitten.

Die Prüfung der Verklebbarkeit fand mit einem PRF, einem MUF- und einem PUR-Klebstoff an Proben mit und ohne künstliche Alterung statt. Es konnte kein Einfluss des Rotkerns festgestellt werden, jedoch zeigten die Proben unterschiedliche Blockscher- und Querzugfestigkeiten in Abhängigkeit vom Klebstoff. Der PRF führte zur höchsten Blockscherfestigkeit mit 18,3 N/mm², gefolgt von MUF mit 15,9 N/mm² und PUR mit 13,5 N/mm². Damit wird der für Fichtenholz geforderte Mindestwert von 10 N/mm² nach EN 301 (2006) erfüllt. Infolge der Alterung lag lediglich die Blockscherfestigkeit des PUR unterhalb des Normwertes. Die Querzugfestigkeiten der Proben ohne Alterungsbeanspruchung zeigten die folgende Reihenfolge: PRF (7,5 N/mm²) > PUR (6,5 N/mm²) > MUF (6,0 N/mm²). Die Werte der gealterten Proben sollten nach EN 301 80 % der nicht gealterten, aber mindestens 2 N/mm² betragen. Nur der PRF konnte beide Anforderungen mit 6,3 N/mm² erfüllen. Die Werte von PUR (3,2 N/mm²) und MUF (2,1 N/mm²) lagen zwar über dem Zahlenwert, aber weit unter den geforderten 80 %. Für die zweite Teilstudie wurden Buchenholzlamellen mit MUF zu bauteilgrosse I-Trägern verklebt und Schubtragfähigkeits- und Klebfugen-Blockscherversuchen unterzogen. Die Träger wiesen entweder keinen oder einen hohen Rotkernanteil auf. Es zeigte sich, dass auch hier der

Rotkern keinen Einfluss auf die Schub- und Blockscherfestigkeit hat. Innerhalb der dritten Teilstudie untersuchte Ohnesorge die Delaminierungsbeständigkeit an mit MUF verklebten sechslamelligen, kleinformatigen BSH-Trägern mit rechteckigem Querschnitt, einer Länge von 1,20 m und einer Breite von 120 mm. Durch unterschiedliche Lamellendicken von 29, 35 und 38 mm variierte die Trägerhöhe. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Delaminierung entscheidend von der Lamellenstärke, der geschlossenen Wartezeit und der Jahrringlage beeinflusst wird. Die höchsten Delaminierungsbeständigkeiten wurden an Trägern mit der kleinsten Lamellendicke von 29 mm und stehenden Jahrringen ermittelt. Eine verlängerte geschlossene Wartezeit auf etwa 40 Minuten verringerte zusätzlich die Delaminierung. Bei Beachtung dieser Punkte, schlussfolgert der Autor, erfüllen BSH-Träger aus Buche die Leistungsanforderungen der Nutzungsklasse 1 (Holzbauwerke in allseitig geschlossenen und beheizten Räumen) nach DIN 1052 (2008).

2.1.5 Güteklassen von Laubholz

Die Einteilung in Güteklassen erfolgt in der Schweiz nach den Holzhandelsgebräuchen. Dabei ist für Rohholz derzeit die Ausgabe 2000, für Schnittholz die Ausgabe 1983 gültig. Ein Blick auf das Datum lässt vor allem bei Schnittholz vermuten, dass die Richtlinien nicht mehr dem aktuellen Stand der Praxis entsprechen. Gründe hierfür sind die Betriebsabläufe beeinflussende technische Fortschritte, aber auch die Entwicklung neuer Produkte im Bereich der verleimten Vollholzprodukte und Massivholzplatten (z.B. BSH), für die einheitliche Festlegungen noch fehlen. Aufgrund dessen wurden die Holzhandelsgebräuche für Roh- und Schnittholz innerhalb eines Projektes unter der Führung von Lignum überarbeitet. Als Ergebnis wurden die beiden Publikationen „Schweizer Handelsgebräuche für Rohholz, Ausgabe 2010“ und „Qualitätskriterien für Holz und Holzwerkstoffe im Bau und Ausbau, Handelsgebräuche für die Schweiz, Ausgabe 2010“ erarbeitet, welche im Moment noch in der Vernehmlassung und damit noch nicht gültig sind. Ab Juli 2010 sind sie bei Lignum erhältlich und werden ab 01.09.2010 mit einer Übergangsfrist von einem Jahr in Kraft treten (Fuhrmann 2010).

Die Schweizerischen Holzhandelsgebräuche für Rundholz (Ausgabe 2000) erlauben eine Sortierung nach Dimension und Qualität bzw. Güte. Unter das Kriterium **Dimension** fallen Mittendurchmesser sowie Länge. Anders als bei Nadelrundholz ist die Längensortierung für Laubrundholz frei, d.h. die Einteilung in Klassen entfällt. Allein eine Mindestlänge von 3 m ist einzuhalten. Die Sortierung nach dem Mittendurchmesser dagegen erfolgt in Zentimetern nach Dezimeterklassen mit folgender Einteilung (Tabelle 2-4):

Tab. 2-4: Durchmessersortierung für Laubrundholz (Zeltner 1999)

Klasse	Mittendurchmesser [cm]
1a	10 – 14
1b	15 – 19
2a	20 – 24
2b	25 – 29
3a	30 – 34
3b	35 – 39
4	40 – 49
5	50 – 59
6	60 und mehr

- Messung unter der Rinde auf halber Länge
- falls erforderlich sind über der Klasse 6 weitere Klassen nach der gleichen Staffelung bildbar

Nach der **Qualität** wird das Laubsägerundholz in die Güteklassen A, B, C und D mit nachstehender Definition eingeteilt (Tabelle 2-5):

Tab. 2-5: Güteklassen von Laubholz (Zeltner 1999)

Güteklasse	Definition
A	Rundholz überdurchschnittlicher/ ausgezeichneter Qualität → ast- und beulenfreie Stammstücke, gerade, kein Drehwuchs → fehlerfrei oder nur unbedeutende Fehler, die eine Verwendung nur unwesentlich beeinträchtigen
B	Rundholz guter bis mittlerer Qualität → einzelne kleine Äste, leichter Drehwuchs, leichte Krümmung → bei Buche einzelne T-Flecken toleriert
C	Rundholz mittlerer bis unterdurchschnittlicher Qualität mit wesentlichen Fehlern → stark astig, grobe Äste in mässiger Zahl → T-Flecken, Drehwuchs, Krümmung, Rot- und Braunkern toleriert
D	Sägefähiges Holz → wird aufgrund seiner Merkmale nicht in die Qualität A, B, C aufgenommen → Merkmale u.a. Nekrose, Spritzkern, Kreuzrisse

- Ermessensspielraum der Qualitätsbeurteilung: vereinzelt auftretende Fehler, welche die Qualitätsmerkmale nicht erfüllen, können durch die sonstige gute Qualität der betreffenden Klassen ausgeglichen werden
- Stamm entsprechend den einzelnen Qualitäten in Sektionen einteil- und messbar, Stamm auch als Ganzes einer Qualität zuordenbar
- Äusserlich erkennbare oder zu vermutende verdeckte Mängel sind im Zweifelsfalle freizulegen
- Sondersortimente sind nach den Ansprüchen des Marktes bereit zu stellen

2.1.6 Sortierung von Laubholz

In der Schweiz wird grundsätzlich zwischen Festigkeits- und Erscheinungssortierung unterschieden. Die Aufgabe der Erscheinungssortierung ist die Einordnung des Holzes bezüglich seiner sichtbaren Oberflächeneigenschaften, die der SIA 118/265 „Allgemeine Bedingungen für Holzbau“ (2004) entnommen werden. Je nach Qualität, d.h. Grad des Hobelns, Menge der Holzfehler wie Äste, Harzgallen, Verfärbungen usw. wird BSH in die Kategorien Auslese (A), Normal (N) oder Industrie (I) eingeteilt.

Festigkeitssortierungen sind notwendig, wenn Holz für tragende Zwecke im konstruktiven Holzbau eingesetzt wird. Inwieweit eine Holzart dafür geeignet ist, hängt im Wesentlichen von ihrem anatomischen Aufbau ab. Die Zusammensetzung der jeweiligen Holzstruktur bestimmt die spezifischen Eigenschaften und prägt damit die spätere Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Holzbauproduktes. Beeinflusst wird dies durch äussere Einflüsse wie Standort, klimatische Bedingungen, Waldstruktur sowie Einschnittechnologie, wodurch es zu Streuungen der Materialkennwerte innerhalb einer Holzart kommt. Daher sind Festigkeitssortierungen unerlässlich, denn sie führen zu optimalen Ausbeuteraten und gewährleisten homogene Produkteigenschaften und gleichmässige Qualitäten. Das Holz wird dafür in Festigkeitsklassen eingeteilt, deren Zuordnung sowohl maschinell als auch visuell vorgenommen werden kann.

Die visuelle Sortierung basiert auf einer Erfassung von holzspezifischen Merkmalen oder Fehlern entsprechend ihres Ausmasses oder Vorhandenseins. Geregelt ist diese in der SIA 265 (2003) „Holzbau“ und der SIA 265/1 „Holzbau - Ergänzende Festlegungen“ (2009). Sortiermerkmale sind Äste, Faserneigung, Markröhre, Jahrringbreite, Risse, Baumkante, Krümmung, Verfärbungen, Fäule und Insektenfrass. Anhand deren Ausbildung wird Schnittholz den Festigkeitsklassen FK 1, FK 2 und FK 3, Rundholz nur FK 2 und FK 3 zugeordnet. Alternativ ist zudem die Sortierung nach der deutschen Norm DIN 4074 möglich.

Teil eins (2008) befasst sich mit der Nadelholz- und Teil fünf (2008) mit der Laubholzsortierung. Hier erfolgt eine Einteilung in die drei Sortierklassen S 7, S 10, S 13 für Nadelholz bzw. LS 7, LS 10 und LS 13 für Laubholz, welche anschliessend einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 1912 (2009) zugeordnet werden können. Für Nadelhölzer existieren die Klassen C 14 bis C 35 und für Laubhölzer D 18 bis D 70. Für die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse gelten in der Schweiz für Rund- und Schnittholz folgende Bedingungen (Tabelle 2-6):

Tab. 2-6: Sortierkriterien in der Schweiz für Rund- und Schnittholz (SIA_265 2003; SIA_265/1 2009)

Bezeichnung	Rundholz		Schnittholz		
	FK 2	FK 3	FK 1	FK 2	FK 3
Wuchsmerkmale					
Jahrring					
- mittlere Breite $j > 4$ mm			nz	z	z
- sprunghafter Wechsel der Breite			nz	nz	z
Reaktionsholz: max. Anteil am Querschnitt [%]	5	10	5	10	20
Schrägfaserigkeit: max. Faserneigung $a//$	1/8	1/5	1/15	1/8	1/5
Verformungen: max. Krümmung $f//$	1/250	1/150			
Äste bei Rundholz:					
- Einzeläste $q_{i,max}$	1/4	1/3			
- Astansammlungen Q_{max}	2/5	1/2			
Äste bei Kanthölzern und Latten:					
- Einzeläste $q_{i,max}$			1/6	1/4	1/3
- Astansammlungen Q_{max}			1/3	1/2	2/3
Äste bei Brettern:					
- Einzeläste $q_{i,max}$			1/5	1/3	1/2
- Astansammlungen Q_{max}			1/3	1/2	2/3
Splint (bei Eiche)					
- Bei vor der Witterung geschützten Bauteilen			z	z	z
- Bei den übrigen Bauteilen: nur bei Imprägnierung			z	z	z
Harztaschen: max. Dicke d in mm			5	6	7
Harzstellen			nz	nz	nz
Überwallungen	zA	zA	zA	zA	zA
Biologische Schädigungen					
Pilzbefall:					
- Holzerstörender Pilzbefall	nz	nz	nz	nz	nz
- Bläue	z	z	s	s	s
- Nagelharte rote Streifen	z	z	nz	s	z
Insektenbefall:					
- pro m max. 10 Ausfluglöcher bis \varnothing 4 mm oder max. 2 Ausfluglöcher mit $\varnothing > 4$ mm, sofern Gewähr besteht, dass keine weitere Zerstörung erfolgt	z	z	nz	z	z
Schnittarten					
Mark:					
- markdurchschnittenes Stück			nz	z	z
- Markstück			nz	nz ¹⁾	nz ¹⁾
Baumkante (Rinde und Bast sind zu entfernen):					
- auf 1 Kante d_{max}/b			0	1/5	1/3
- auf 2 Kanten d_{max}/b			0	1/8	1/5
- auf 4 Kanten d_{max}/b			0	0	1/8
Darrdichte, Rohdichte, Holzfeuchte			s	s	s
Mechanische Schädigungen	nz	nz	nz	nz	nz
Risse: Innen-, Quer-, Schäl-, Blitz- und Frostrisse	nz	nz	nz	nz	nz
Rinde und Bast	nz	nz			

¹⁾ Markstücke sind für Bauteile zugelassen, deren Schub- oder Scherbeanspruchung die Hälfte der Bemessungswerte nicht überschreitet
s: spezielle Vereinbarungen vorbehalten, normalerweise keine Einschränkungen
z: zulässig nz: nicht zulässig zA: zulässig im Ausmass bis zum grössten erlaubten Astdurchmesser

Die maschinelle Sortierung erfolgt über die Ermittlung bestimmter Merkmale wie Rohdichte, Astigkeit, Faserabweichung oder statischer und dynamischer E-Modul durch maschinenkontrollierte Systeme. Anhand der ermittelten Werte kann das Holz mittels DIN EN 338 (2008) einer Festigkeitsklasse entsprechend der Benennung aus der DIN EN 1912 (2009) zugeordnet werden.

Ziel ist eine exakte Holzsortierung, um die höchstmögliche Ausbeute zu erreichen. Dazu werden Sortierparameter gewählt, welche die höchste Korrelation zur Zugfestigkeit aufweisen. Wenig geeignet sind Astigkeit, Faserneigung, Rohdichte und Jahrringbreite, wenn diese als Einzelkriterium betrachtet werden. Hohe Korrelationskoeffizienten ergeben E-Modul und kombinierte Sortierungen von Astigkeit und Rohdichte sowie E-Modul und Rohdichte. Der grösste Koeffizient wird allerdings bei einer Sortierung nach E-Modul und Astigkeit erreicht. Wichtigstes Sortierkriterium von allen ist der E-Modul, da dieser in Kombination, aber auch alleine hohe Koeffizienten liefert. Er kann statisch durch mechanische Belastungsverfahren und dynamisch mittels Schall oder Eigenfrequenz der Schwingungen ermittelt werden, allerdings nur auf maschinellem Wege. Das verdeutlicht auch die Grenzen der visuellen Sortierung. Effizientestes Sortierkriterium hier ist die Astigkeit, die jedoch auch nur mässig mit der Zugfestigkeit korreliert. Zudem mangelt es der Methode an Objektivität, Reproduzierbarkeit und Ungenauigkeit, da innere Merkmale nicht oder erst zu spät entdeckt werden. Vor- und Nachteile der maschinellen Sortierung sind in Tabelle 2-7 aufgeführt.

Tab. 2-7: Vor- und Nachteile der maschinellen Sortierung (Steiger 2009)

maschinelle Sortierung	
statisches Verfahren	dynamisches Verfahren
<ul style="list-style-type: none"> - lokaler E-Modul korreliert stark mit Festigkeit - effektive (statische Belastung) 	+
<ul style="list-style-type: none"> - Bauteildicke < ca. 75 mm → ungeeignet für Kant-hölzer - keine Prüfung der Bauteilenden → Kappung - Maschinen verhältnismässig teuer 	-
	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit - keine Beschränkung in den Querschnittsmassen - Ortsunabhängigkeit (mobile Kleingeräte) - globaler E-Modul korreliert weniger stark mit der Festigkeit - keine exakte Lokalisierung der schwächsten Stelle

Eine besondere Bedeutung hat die Verwendung dieser Korrelationen für die Etablierung und zukünftig vermehrte Anwendung von Vollholzwerkstoffen aus Laubholz im Bauwesen. Nadelhölzer wie Fichte oder Tanne dominieren derzeit als Rohstoffe für BSH, Kreuz-, Duo- und Triobalken. Daher sind auch die in den Holzbaunormen festgelegten Anforderungen auf die Festigkeit von Nadelholz ausgerichtet. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass mit Hilfe einer guten Sortierung hochfeste Produkte aus Laubholz möglich wären. Zudem liesse sich die Festigkeitssortierung und damit die Trennschärfe zwischen den einzelnen Sortierklassen nach DIN 4074-5 (2008) optimieren.

Frühwald und Schickhofer (2005) untersuchten dazu visuell sortierte Buchen-, Eschen- und Eichenlamellen. Nach Bestimmung des dynamischen und statischen E-Moduls sowie der Biege- und Zugfestigkeiten wurden die Korrelationen unter den Sortierparametern bestimmt. Die einzelnen E-Moduln und Zugfestigkeiten waren vor allem für Buche und Esche sehr hoch, für Eiche bedeutend niedriger. BSH aus Buche und Esche könnte demnach erheblich höheren Festigkeitsklassen zugeordnet werden. Anders als in vielen Normen für Festigkeitsklassen angenommen, stellten die Autoren jedoch keine Korrelation zwischen Festigkeit und Dichte fest. Europäische Hartlaubhölzer erreichen demnach nicht die erforderlichen Dichten, jedoch die notwendigen E-Moduln und Festigkeiten der höheren Festigkeitsklassen. Zudem kamen die Autoren zu dem Schluss, dass Astigkeit und

dynamischer E-Modul die wichtigsten Sortierparameter darstellen. Die Faserneigung hat ebenso einen Einfluss auf die Moduln, deren Korrelation ist jedoch aufgrund des dreidimensionalen Faserwinkels der Laubhölzer schwer zu bestimmen.

Hübner (2007) berichtet, dass durch Optimierung der Sortierkriterien und –grenzen die Einordnung der Lamellen in eine Sortierklasse viel einfacher und genauer vorgenommen werden kann. Vor allem die Zugfestigkeit, näherungsweise abgeschätzt über den E-Modul aus der Eigenfrequenz der Lamellen, den DIN-Einzelast¹, die DIN- Astansammlung² erwiesen sich als am besten voraussagbare Kriterien. E-Modul und Astigkeit sind daher die beiden Sortierkriterien mit der höchsten Korrelation zur Festigkeit. Durch die bessere Abtrennung und die Reduzierung der Sortierkriterien war es möglich, das Festigkeitspotential des Laubholzes bei gleichzeitiger Senkung des Ausschusses besser auszunutzen. Anhand der Ergebnisse wurde eine Einteilung in die Sparte Ausschuss sowie fünf Sortierklassen von LHK 1 bis 5 mit Angaben zu Einzelästen bzw. Astansammlungen, zulässiger Markröhre, Fäulnis, Zug-, Biegefestigkeit und dynamischem E-Modul vorgeschlagen.

2.1.7 Aktuelle Normensituation im Holzbau

Dass Nadelholz der im Holzbau derzeit vorwiegend eingesetzte Rohstoff ist, hängt u.a. mit den Anforderungen der aktuellen Normen zusammen. Für etwaige Produkte aus Laubholz existieren keine Angaben zu herstellungsrelevanten Eigenschaften wie Festigkeit oder Verklebung. Anhand von BSH, einem der wichtigsten Holzbauprodukte, soll die unglückliche Situation verdeutlicht werden.

In der Schweiz hergestelltes BSH sollte nach Möglichkeit aus Nadelholz bestehen, allerdings erlaubt die Holzbaunorm SIA 265 auch andere Lamellenaufbauten und damit indirekt den Einsatz von Hartlaubhölzern sowie ein Mischen verschiedener Holzarten. Anders ist es auf EU-Ebene, wo die Anforderungen an BSH in der EN 14080 „Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen“ (2009) geregelt sind. Neben 13 Nadelholzarten ist hier ausdrücklich lediglich die Pappel für BSH zugelassen. Zudem ist es untersagt, Nadel- und Laubholz in einem BSH-Träger zu kombinieren. In Deutschland umfasst dies bis zum jetzigen Zeitpunkt sogar nur sieben Nadelhölzer, was mit der Gültigkeit der EN 14080 zusammenhängt. Bei der EN 14080 handelt es sich um eine harmonisierte europäische Produktnorm, die konkurrierende nationale Normen ersetzen soll, um einen freien Handel innerhalb Europas zu ermöglichen. Bis zum endgültigen Zeitpunkt des Rückzugs läuft die sogenannte Koexistenzphase, die nach mehrmaliger Verlängerung für diese Norm am 01.04.2011 endet. Theoretisch müsste während dieser Zeit die harmonisierte Norm bereits anwendbar und bisherige Normen nur noch alternativ gültig sein. Tatsächlich ist es in Deutschland jedoch so, dass BSH zwar nach der deutschen Normvariante DIN EN 14080 hergestellt und gehandelt, aber noch nicht angewendet werden darf. In einer harmonisierten Norm werden Anforderungen an das Produkt, Mindestanforderungen an die Herstellung, Art und Umfang der Überwachung und die Kennzeichnung beschrieben. Es bedarf jedoch weiterer sogenannter Anwendungsregeln, die aber für Deutschland noch nicht veröffentlicht sind. Allerdings wurde im Oktober 2009 in Deutschland ein entscheidender Schritt zur Zulassung von BSH aus Buche und Hybridträgern getan. Basierend auf Untersuchungen der Universität Karlsruhe (Blaß et al. 2005; Blaß und Frese 2006) und der TU München (Schmidt et al. 2009) erteilte das Deutsche Institut für Baustoffe (DIBt) den

¹ Einzelast: Anordnung eines Astes, bei dem sich der Faserverlauf bis zum nächsten Ast normalisiert hat; Abstand zu benachbarten Ästen in Längsrichtung mehr als 150 mm

² Astansammlung: Ansammlung von Ästen, bei denen zwischen den Ästen keine Normalisierung des Faserverlaufs erkennbar ist.; Abstand zwischen den benachbarten Ästen in Längsrichtung weniger als 150 mm

Materialien die bauaufsichtliche Zulassung für die Verwendung in beheizten Innenräumen. Alle in der allgemeinen Holzbaunorm DIN 1052 (2008) genannten Holzbauteile, für die die Verwendung von Vollholz oder BSH erlaubt ist, dürfen seither auch aus Buche bestehen. Die Zulassung enthält detaillierte Angaben u.a. zu Sortierkriterien, Keilzinkenverbindung, Klebstoffbedingungen und Festigkeitseigenschaften. Diese Massnahme vereinfacht Unternehmen ungemein die Herstellung, vor allem nunmehr nach geregelten Bemessungsgrundlagen.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK	
<small>Anstalt des öffentlichen Rechts</small>	
<small>10829 Berlin, Kolonnenstraße 30 L Telefon: 030 78730-317 Telefax: 030 78730-320 GeschZ.: II 23-1.9.1-675</small>	
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung	
Zulassungsnummer:	Z-9.1-679
Antragsteller:	<small>Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. Elfriede-Stremmel-Straße 69 42369 Wuppertal</small>
Zulassungsgegenstand:	<small>BS-Holz aus Buche und BS-Holz Hybridträger</small>

Abb. 2-2: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Brettschichtholz aus Buche und Hybridträger (www.waldwissen.net)

Obwohl in der Schweiz Laubhölzer grundsätzlich erlaubt sind, fehlen auch hier noch die Benennung konkreter Festigkeitsklassen der Laubholzlamellen sowie Hinweise zur Klebfestigkeit, um den Anforderungen als Bauholz für tragende Zwecke gerecht zu werden. Dieser Ist-Zustand der Normen und Richtlinien schränkt die Firmen ein. Ein Schweizer Unternehmen, wie die Neue Holzbau AG, kann zwar Konstruktionen herstellen, allerdings diese aufgrund der gültigen SIA 265 (2003) nur in der Schweiz anbieten.

2.2 Sortimente des Laubholzes vom Wald bis zum Einschnitt

2.2.1 Holzsortimente nach der Holzernte

In Abhängigkeit von der Qualität des Holzes, erfolgt nach der Holzernte die Einteilung in folgende drei Sortimente:

- ◆ **Stammholz:** Rundholz, welches für die Verarbeitung in der Sägerei oder in Furnierwerken vorgesehen ist, auch Sägerundholz genannt
- ◆ **Industrieholz:** Holz für die Verarbeitung in der Papier- und Holzwerkstoffindustrie in Form von Rundholz, Schwarten, Spreisseln, Hackschnitzeln und Sägespänen, da es für die Verarbeitung in Sägereien nicht geeignet ist
- ◆ **Waldenergieholz:** Holz für die energetische Nutzung aus dem Wald in Form von (Brennholz) Reisig, Zapfen, Hackschnitzeln, Spänen, Sägemehl und Rinde

Um die Problematik der Laubholzverwertung zu verdeutlichen, wird in der folgenden Grafik die Verteilung der einzelnen Sortimente auf Nadel- und Laubholz anhand von Holzerntezahlen aus dem Jahre 2008 dargestellt. Insgesamt wurden 2008 5,26 Mio. m³ Holz geerntet, was im Vergleich zu 2007 ein Minus von ca. 43.000 m³ bedeutet. Nadelholz nimmt dabei mit 3,73 Mio. m³ einen Anteil von 70,8 % und Laubholz mit 1,54 Mio. m³ einen Anteil von 29,2 % ein. Die drei Sortimente Stammholz, Industrieholz und Waldenergieholz verteilen sich bezogen auf die geerntete Gesamtmenge folgendermassen (Abb. 2-3):

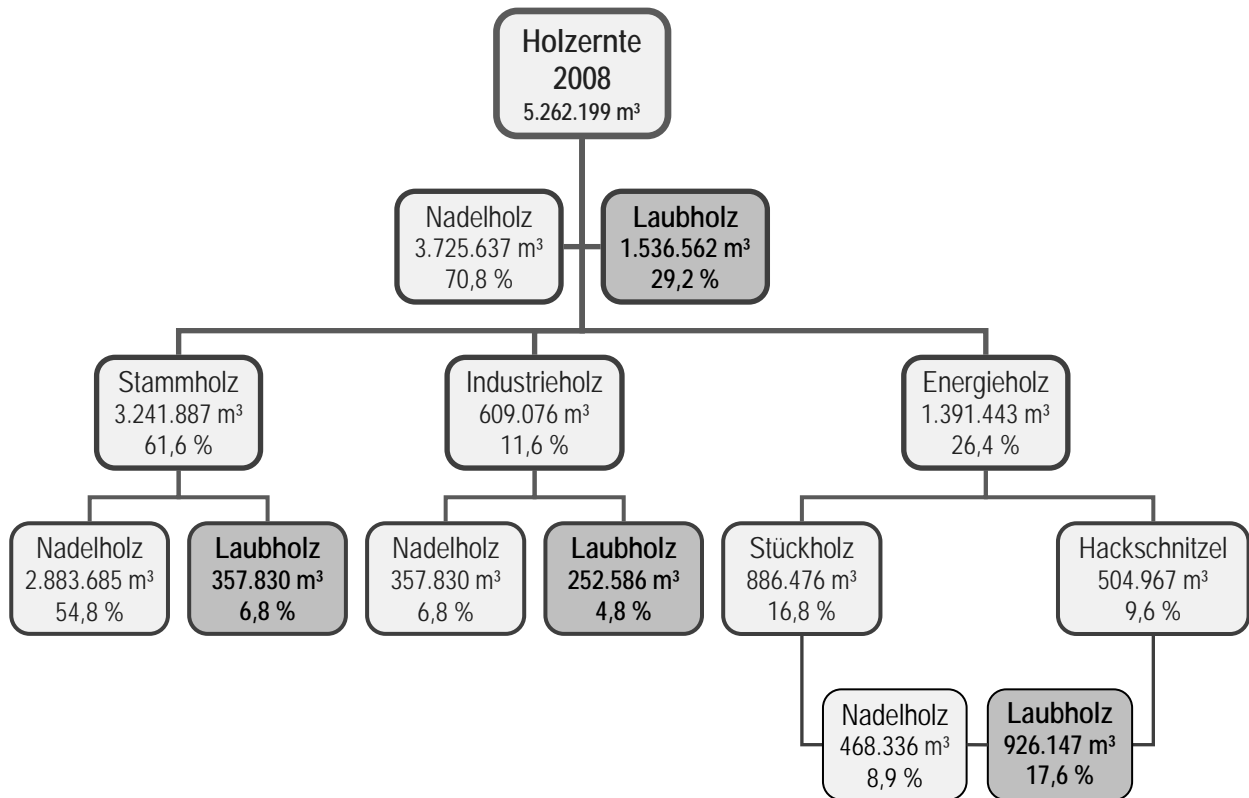


Abb. 2-3: Aufteilung der Holzernte 2008 in Sortimente und Holzart (nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik)

Es ist deutlich zu sehen, dass der Einschlag von Laubholz gemessen an der Gesamternte nur einen geringen Teil ausmacht. Allein in der Kategorie Energieholz überragt Laubholz das Nadelholz. Mit 17,6 % stellt dies zudem die grösste Nutzungsart in den drei Sortimenten dar. Werden Laub- und Nadelholz getrennt betrachtet, so bedeutet dies, dass ca. 60 % des insgesamt geernteten Laubholzes sofort und nur energetisch genutzt werden, ohne das Holz einer vorherigen Verwendung zuzuführen. Bei Nadelholz sind es lediglich ca. 12,5 %. Ziel sollte es jedoch zum einen sein, mehr Laubholz zu ernten und zum anderen, Laubholz intensiver als Stamm- und Industrieholz zu verwerten. Die Nutzung als Energieholz kann zwar beibehalten werden, allerdings sollte dies die letzte Verwendungsmöglichkeit der Kette darstellen.

2.2.2 Rundholzsortimente für die Schnittholz- und Furniererzeugung

In der Schweiz wurden 2008 von den Sägereien insgesamt 2,51 Mio.m³ an Rundholz eingeschnitten, davon 2,37 Mio.m³ Nadelholz, wobei allein 2,30 Mio.m³ die Fichte und die Tanne einnahmen. Der Anteil des Laubholzes in Höhe von 139.677 m³ betrug lediglich 5 % der Gesamtmenge. Als Schnittholz wurden 1,54 Mio.m³ verwertet, aufgeteilt in 1,45 Mio.m³ Nadel- und 92.595 m³ Laubholz. Das verbliebene Restholz (972.341 m³) gliedert sich in 925.259 m³ Nadelholz und 47.082 m³ Laubholz. Verglichen mit dem Rundholzeinschnitt fällt auf, dass sowohl bei Nadel- als auch bei Laubholz nur 2/3 des Stammes zu Schnittholz verarbeitet werden kann. Bei Nadelholz liegt der Wert mit 61 % sogar darunter.

Im Vergleich zu 2007 liegen die Schnittholz mengen bei Nadelholz etwas niedriger, Laubholz dagegen verzeichnete einen Zuwachs von ca.14.000 m³. Trotzdem gestaltet sich der Einschnitt von Laubholz noch immer problematisch. Aus dem „Jahrbuch Wald und Holz 2008“ geht hervor, dass gerade einmal 40 % des geernteten Laubholzes von eher kleinen Schweizer Sägewerken zu Schnittholz verarbeitet werden (BAFU 2009). Auch die Furnierherstellung hat seit 2001 stark abgenommen. Nach FAOSTAT (2009) lag die Produktionsmenge von 1990 bis 2001 konstant bei 30.000 m³ pro Jahr, erlebte dann aber einen Einbruch und erreichte 2006 mit 4.500 m³ den Tiefstand. 2007 stieg die Nachfrage etwas mit 6.000 m³ an, trotzdem schloss eines der zwei in der Schweiz ansässigen Furnierwerke. Der Grund für den massiven Rückgang ist vor allem die Verlagerung der Fertigung in osteuropäische Staaten verbunden mit niedrigeren Produktionskosten und attraktiverer Preisgestaltung.

2.2.3 Sortimente des Abfallholzes

Abfallholz kann in drei Kategorien eingeordnet werden. Die erste bildet das im Sägewerk anfallende Restholz, welches durch den Einschnitt von Stammholz entsteht und als Rohstoff in der Papier-, Zellstoff- und Plattenindustrie sowie als Energieholz dient.

Die zwei weiteren Kategorien beinhalten das auf dem Rundholzplatz entstehende oder aussortierte Industrieholz und Waldenergieholz, welches nicht für eine Verarbeitung zu Schnittholz geeignet ist. Industriestammholz wird wie Restholz in der Papier- und Zellstoffindustrie verwertet. Die nachfolgende Grafik (Abb. 2-4) zeigt die Aufteilung ergänzt durch die jeweiligen Mengen- und Prozentangaben von 2008.

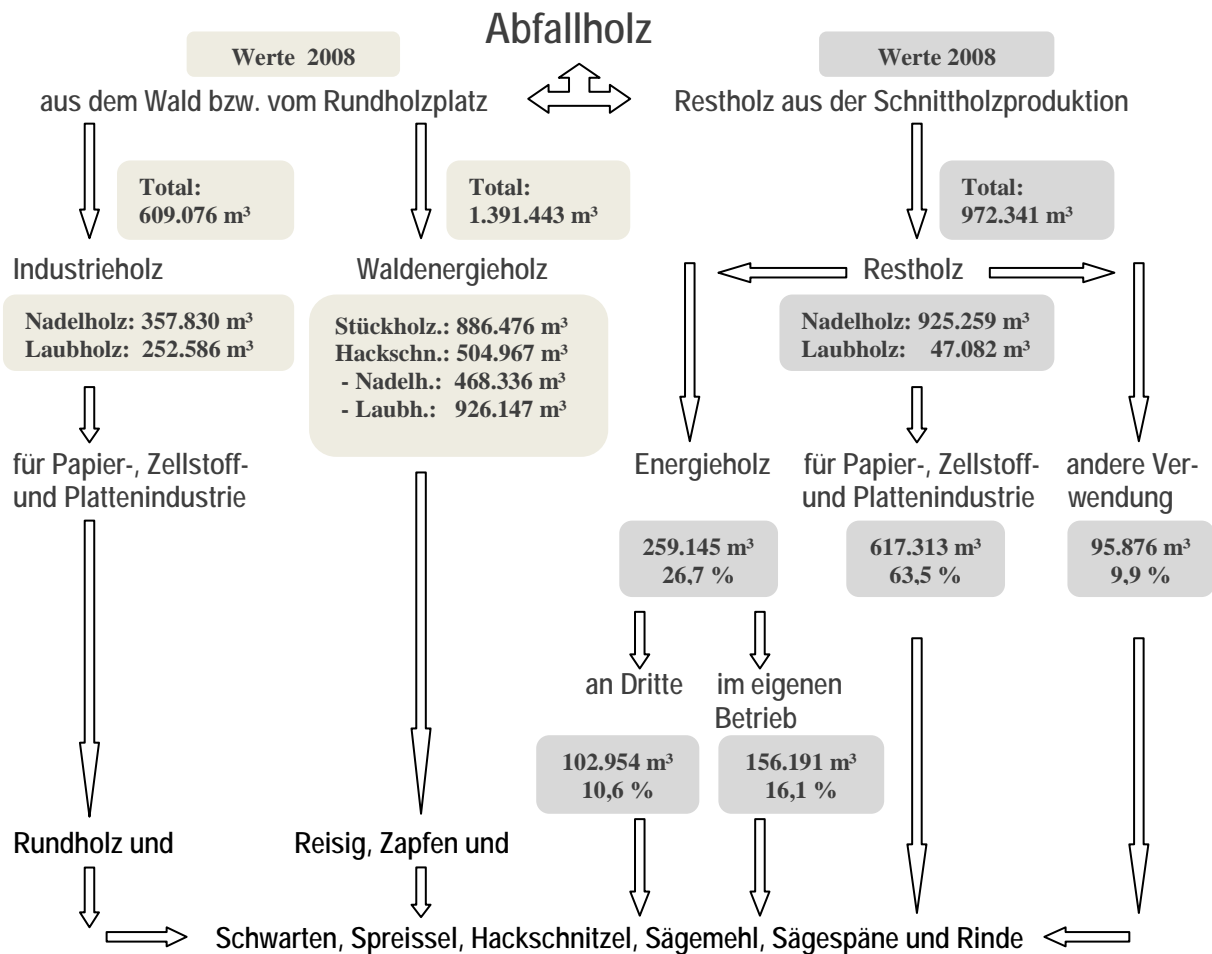


Abb. 2-4: Sortimente des Abfallholzes (Werte von 2008 nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik)

Durch Addition der Totalwerte ergab sich für 2008 in der Schweiz eine Gesamtsumme an Abfallholz von 2,97 Mio.m³. Gemessen an der gesamten Holzernte mit 5,26 Mio.m³ wurden also 56,5 % in Form von Schwachholz, Schwarten, Sägespänen oder ähnlichem verwertet. 1,75 Mio.m³ entfallen auf Nadelholz und 1,23 Mio.m³ auf Laubholz. Ausgehend von den ungleichen Holzerntezahlen von Nadelholz und Laubholz (ca. 3,73 zu 1,54 Mio. m³) wird deutlich, wie verschwenderisch mit dem Rohstoff Laubholz umgegangen wird. Auch Laubholzreste können neben der energetischen Verwertung im Sinne der Kaskadennutzung anderen Einsatzgebieten zugeführt werden. Der derzeitige Umgang mit der wertvollen Ressource gleicht eher dem von Entwicklungsländern, die Holz ebenfalls überwiegend zur Verbrennung einsetzen, allerdings mit dem Unterschied, dass sie zum Überleben darauf angewiesen sind.

2.2.4 Schnitt- und Restholzsortimente aus dem Sägewerk

Ziel des Stammholzeinschnitts im Sägewerk ist die höchstmögliche Ausbeute an Schnittholz. Dabei gelten Laubhölzer als unprofitabler, da sie sich bedingt durch die Anatomie und meist krummeren Stammformen schwieriger verarbeiten lassen. Daneben unterscheiden sich auch Aufbau von Schaft und Krone von den Nadelhölzern. Durch ein zumeist umfangreicheres Astwerk und Blätterdach weisen Laubbäume lediglich einen nutzbaren Stammholzanteil von 40-50 %, Nadelbäume dagegen von 80 % auf (Thees 2009). Einen zusammenfassenden

Überblick über die Stammholz-, Schnittholz- und Restholzanteile sowie einzelne Schnittholz- und Restholzprodukte gibt die nachstehende Illustration (Abb. 2-5). In den folgenden Abschnitten erfolgt eine genauere Beschreibung bzw. Analyse der Aspekte.

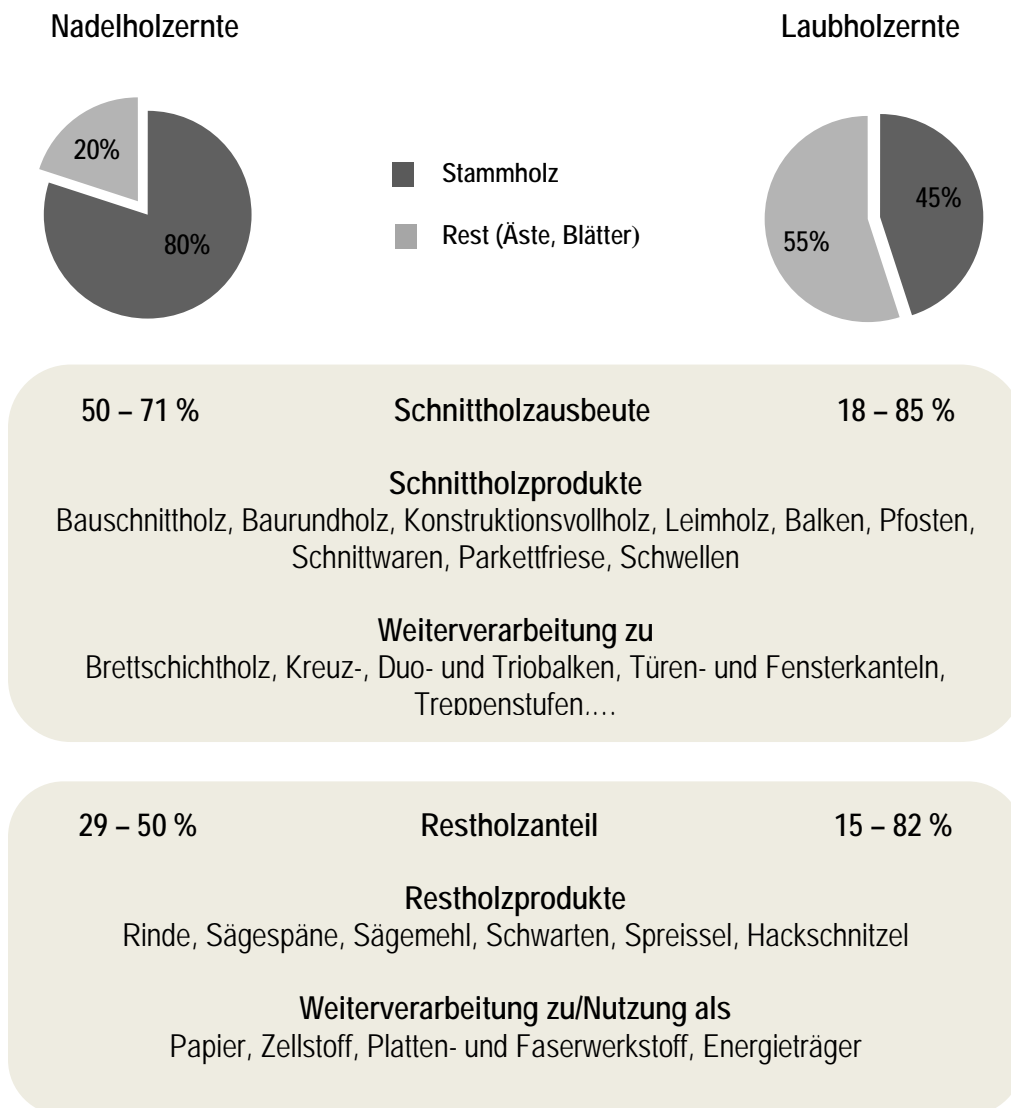
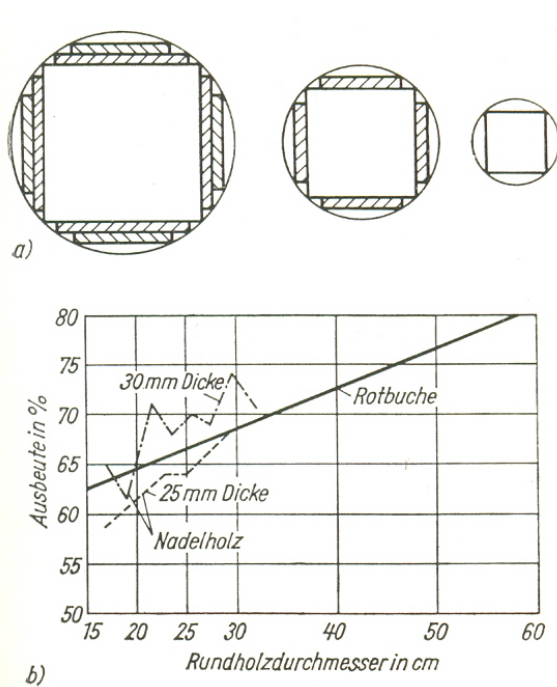


Abb. 2-5: Überblick über Stammholzanteil sowie Schnitt- und Restholzsortimente von Nadel- und Laubholz (Autorenkollektiv 1975; Thees 2009; Krackler et al. 2010)

2.2.5 Schnittholzausbeute

Die Ausbeute an Schnittholz ist von verschiedenen Aspekten abhängig. Neben Stammdurchmesser, Schnittprogramm und Einschnittart spielen auch Holzqualität, Schnittfugengrösse sowie Schnitttechnologie (Gatter-, Band- oder Kreissäge) eine Rolle (Fronius 1991). Mit steigendem Rundholzdurchmesser steigt die Schnittholzausbeute. Die folgende Grafik (Abb. 2-6) zeigt, dass bei Rotbuche im Gegensatz zum Nadelholz von einer kontinuierlichen Zunahme ausgegangen werden kann.



a) steigende Nutzungsmöglichkeit der ausserhalb des Hauptproduktes liegenden Segmente

b) Ausbeute in Abhängigkeit vom Rundholzdurchmesser für Nadelholz und Rotbuche

Abb. 2-6: Abhängigkeit der Schnittholzausbeute vom Rundholzdurchmesser (Autorenkollektiv 1975)

Die Schnittholzausbeute beträgt bei Nadelhölzern zwischen 50-71 %. Eine unter Laubholzsägern durchgeführte Umfrage (Krackler et al. 2010) ergab, dass die Schnittholzausbeute bei Laubhölzern zwischen 18 und 85 % liegen kann und stark vom Endprodukt abhängt. Anzumerken ist, dass es sich hierbei um reine Erfahrungswerte der befragten Betriebe handelt. Im Durchschnitt liegt die Schnittholzausbeute bei Laubhölzern um die 50 %. Im Gegensatz zum Nadelholz ist es schwierig, in der Literatur konkrete Angaben zu Laubholz zu finden.

2.2.6 Vergleich der Schweizer Holzsortimente mit Deutschland und Österreich

Waldbestand und Holzvorräte entwickeln sich in anderen europäischen Ländern ähnlich wie in der Schweiz. Da Österreich und Deutschland unmittelbare Nachbarländer und zudem zwei der wichtigsten Holzlieferanten in Europa sind, wird spezifisch auf deren Situation eingegangen.

In beiden Ländern zeichnet sich ebenso eine Vorratsänderung des Waldes zugunsten des Laubholzes ab. Das belegen die Ergebnisse der jüngsten österreichischen Waldinventur (ÖWI) von 2000-2002 und der aktuellsten deutschen Bundeswaldinventur (BWI), die in den Jahren 2001 und 2002 erhoben wurde. Aus den Bestandsaufnahmen geht ebenso hervor, dass Nadelholz, in diesen Ländern speziell die Fichte, an Fläche verloren hat. Gründe hierfür sind ebenso wie in der Schweiz klimatische Bedingungen, Witterungsschäden und waldbauliche Massnahmen angelehnt an einen naturnahen Waldbau. Auf sturmbetroffenen und -gefährdeten Standorten wird die Fichte durch Laubbäume ersetzt. Diese Art der Praxis verdeutlicht den Trend weg von Fichtenreinbeständen und hin zu Laub- und Mischwäldern. Besonders Deutschland weist mit einem Rückgang des Reinbestandes um 21 % eindeutige Werte auf.

Die Buche ist auch in Österreich mit 10 % und in Deutschland mit 15 % die dominante Laubholzart. Ebenso wie in der Schweiz wird nur ein Bruchteil der Buche und auch des

restlichen Laubholzes eingeschlagen und verwertet. Von den insgesamt 76,73 Mio. in Deutschland geernteten Kubikmetern Holz im Jahre 2007 entfielen gerade einmal 13,12 Mio.m³ auf die Laubhölzer. Damit beträgt deren Anteil am Gesamteinschlag bloss ein Sechstel. Das ist sogar noch weniger als in der Schweiz, wo die Laubholzernte 2007 ungefähr ein Viertel ausmachte. Zu erwähnen ist jedoch, dass der Holzeinschlag in Deutschland 2007 aufgrund des geworfenen Holzes durch Orkan „Emma“ aussergewöhnlich hoch war. 2006 betrug der Gesamtholzeinschlag in Deutschland 62,29 Mio.m³, im Jahre 2008 lediglich 55,4 Mio.m³, sicherlich zudem eine Folge der Finanzkrise. Auch dieses Sturmtief verdeutlichte, dass vor allem reine Nadelholzbestände durch derartige Wetterereignisse gefährdet sind. Im Gegensatz zur geschlagenen Menge von 63,61 Mio.m³ im Jahre 2007 zählte die geerntete Nadelholzmenge 2008 nur 42,75 Mio.m³. Laubholz dagegen wies 2008 trotz schwächelnder Konjunktur nur ein leicht rückgängiges Einschlagvolumen von 12,61 Mio.m³ auf, was einen Anteil von 22,7 %, gemessen an der gesamten geschlagenen Holzmenge, bedeutet. Den Daten des Lebensministeriums ist zu entnehmen, dass in Österreich die Werte für Nadel- und Laubholz noch stärker differieren. Demnach betrug im Jahre 2008 der Nadelholzanteil an der Gesamternte 86,6 %, also wurden nur 13,4 % an Laubholz eingeschlagen. Mit Hilfe der nachstehenden Tabelle 2-8 wird ein Überblick über die drei Länder gegeben. Da die Daten von 2008 noch unvollständig sind, werden zur besseren Vergleichbarkeit die Ergebnisse von 2007 dargestellt.

Tab. 2-8: Vergleich des Holzeinschlages der Schweiz, Österreichs und Deutschlands aus dem Jahre 2007 (nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft und Lebensministerium-Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz)

Land	Holzeinschlag bzw. Holzernte in Mio. m ³ (2007)								
	Insge- samt	Nadelholz				Laubholz			
		Insge- samt	Stamm- holz	Indus- trieholz	Ener- gieholz	Insge- samt	Stamm- holz	Indus- trieholz	Ener- gieholz
Schweiz	5,69	4,21	3,29	0,43	0,30	1,48	0,36	0,27	0,61
Österr.	21,80	18,88	12,72	2,98	3,16	2,91	0,42	0,63	1,86
Deutschl.	76,73	63,61	42,80	13,55	4,45	13,12	4,00	3,51	4,25

Die Gegenüberstellung veranschaulicht, dass, bezogen auf die jeweiligen Gesamteinschlagmengen, die Laubholzernte in Österreich mit 13,4 % und Deutschland mit 17,1 % sogar noch geringer als in der Schweiz (26,0 %) ausfällt. Auch in Österreich und Deutschland stellt Laubholz in den Kategorien Stamm- und Industrieholz nur eine Minderheit dar, da der überwiegende Teil für energetische Zwecke genutzt wird.

2.3 Verarbeitungstechnologie von Laubholz im Sägewerk

2.3.1 Laubholzbedingte Einflüsse auf die Verarbeitung

Ziel jedes Sägewerkes ist die bestmögliche Ausnutzung jedes Stammes entsprechend der Holzqualität und der Anwendung. Abhängig ist dies neben der Einschnittechnologie auch von wachstumsbedingten und holzanatomischen Eigenschaften. Härtegrad, Faserstruktur,

Harzgehalt sowie Stamm- bzw. Blockform bestimmen den Schwierigkeitsgrad des Einschnittes. Daher zeichnen sich Hartlaubhölzer wie Eiche und Buche im Gegensatz zu den meisten Nadelhölzern durch eine schwierige Verarbeitung aus. Vor allem durch die höhere Härte wird den Sägen ein grösserer Widerstand entgegengesetzt, der gleichsteht mit einem höheren Energieverbrauch, einer geringeren Werkzeugstandzeit und einer niedrigeren Mengenleistung. Im Verhältnis gesehen ist für Laubhölzer folgende höhere Schnittleistung aufzubringen, wenn für Fichte und Tanne von einem Wert von 1,0 ausgegangen wird:

Tab. 2-9: Verhältnis der nötigen Schnittleistung einiger Laubhölzer zu Fichte/Tanne (Fronius 1989a)

Holzart	Aufzubringende Schnittleistung
Fichte/ Tanne	1,0
Rotbuche	1,10...1,20
Esche	1,20
Eiche	1,20...1,30
Ahorn	1,20
Erle	1,15
Birke	1,15
Rüster (Cioldi et al.)	1,25

Positiv ist jedoch die Faserlänge zu bewerten. Die kürzeren Fasern der Laubholzer lassen sich sauber durchtrennen und führen zu glatten Schnittflächen. Für Sägeblätter, die langfaserige Hölzer einschneiden, ist ein grösserer Schrank erforderlich, da die Fasern besonders bei stumpferen Sägezähnen mitunter abgequetscht oder abgerissen werden können.

Doch auch innerhalb eines Stammes schwankt die Qualität des Holzes. Um daher gleichwertige Sortimente zu erhalten, wird der Stamm vor der Bearbeitung in Erd-, Mittel- und Zopfblock eingeteilt. Der Zopf als schwaches Stammende ist aufgrund seiner starken Grobastig- und Abholzigkeit nur bedingt für Schnittholzprodukte geeignet und wird daher vorwiegend als Industrie- oder Energieholz verwendet. Der mittlere Stammabschnitt wird zu Schnittwaren, jedoch geringerer Güten wie z.B. Schwellen, eingeschnitten. Problematisch sind die hier zum Teil erheblichen wachstumsbedingten Eigenspannungen, die eine Verarbeitung erschweren. Das hochwertigste Holz liefert der wurzelnahe Erdblock, dessen Schnittprodukte deswegen für Schreinerarbeiten oder zur Herstellung von Furnier verwendet werden. Zusätzlich zur Längeneinteilung erfolgt in Abhängigkeit von der Holzart eine Abgrenzung über den Querschnitt in Splint-, Kern- und Herzzone. Wegen seiner höheren Dauerhaftigkeit wird das meist dunklere Kernholz üblicherweise besser bewertet und daher durch geeignete Schnittprogramme vom biotisch anfälligeren Splintholz getrennt.

2.3.2 Schnitterzeugnisse und Maschinen

Die Wertschöpfung von Rundholz sollte so hoch wie möglich sein. Vom Haupterzeugnis übrig gebliebene Seitenwaren werden soweit möglich zu weiteren Nebenschnittwaren verarbeitet. Auch die eigentlichen Holzreste wie Schwarten, Spreissel oder Sägespäne werden stofflich, chemisch oder energetisch verwertet. Nach Fronius (1989b) kann für die Erzeugnisse mit folgenden prozentualen Angaben bezüglich der Aufteilung über den Querschnitt gerechnet werden:

Tab. 2-10: Schnitterzeugnisse und Ausbeuten (Fronius 1989b)

Erzeugnis	Mittelwert [%]	Gesamtbereich [%]
Haupterzeugnis	50	35...80
Nebenerzeugnis	20	5...35
Spreissel u. Schwarten	17	10...25
Sägespäne	13	7...22

Auch die Bearbeitungsmaschinen gliedern sich in Haupt- und Nebenmaschinen. Zu den Hauptmaschinen zählen das Gatter, verschiedene Bandsägetypen, Kreissägen, Zerspaner und Profilieraggregate. Die am meisten genutzte Maschine für den Laubholzeinschnitt in Sägewerken ist nach wie vor die Blockbandsäge. Im Gegensatz zum Nadelholzeinschnitt handelt es sich (von Ausnahmen abgesehen) bei der Verarbeitung von Laubholz noch um keine Massenproduktion. Aufgrund des teureren Rundholzpreises, der vergleichsweise schwierigeren Verarbeitung, aber auch des höheren Wertes des eingeschnittenen Laubholzes zählen sowohl qualitative als auch quantitativ hohe Schnittholzausbeuten. Dies bedarf einer flexiblen Maschine wie der Blockbandsäge, die problemlos an Rundholzsortimente angepasst werden kann und ein „Filetieren“ der Stämme ermöglicht. Positiv ist zudem die hohe Schnittgüte und die gegenüber Gattern geringe Schnittfugenbreite. Spezialausführungen wie Schrägbandsägen gestatten einen noch bessere Ausnutzung. Jedoch kommen je nach Einschnittart auch Gatter wie das Vertikalgatter zum Einsatz. Mit Nebenmaschinen werden die Nebenerzeugnisse aufgearbeitet. Eingesetzt werden dabei für die Längsschnitte Besäum- und Trennkreissäge, für die Querschnitte Ablängkreis- bzw. Kappsägen.

2.3.3 Einschnittarten für Laubrundholz

Qualitätsbestimmend ist nicht nur die richtige Maschinenauswahl, sondern ebenso die Einschnittart. Durch die geeignete Wahl können massgeblich die Eigenschaften der Schnittware beeinflusst werden. Beispielsweise sind im Riftschnitt hergestellte Schnittwaren aufgrund der stehenden Jahrringe formstabil, wohingegen Seitenbretter mit liegenden Jahrringen oft zu Rissbildung und Verformungen neigen. Die folgenden Abbildungen 2-7 bis 2-10 zeigen mögliche Einschnittarten für Laubrundholz.

Für Laubholz werden vor allem **Brett- und Dielenschnitte** angewendet, bei dem sowohl unbesäumte als auch besäumte Ware entsteht.

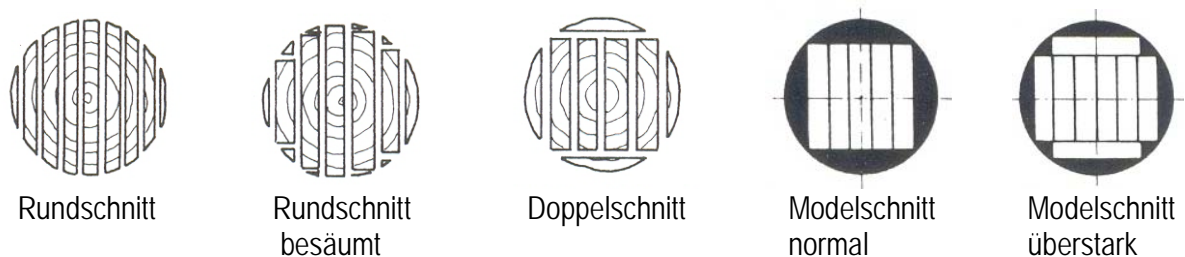
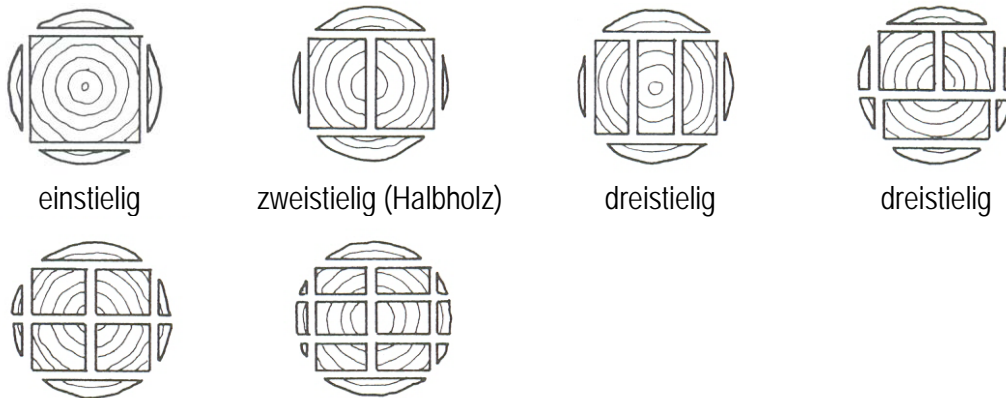


Abb. 2-7: Brett- und Dielenschnitte (Fronius 1989a; Lohmann und Annies 1998)

Für grössere Abmessungen kommen u.a. folgende **Kantholzschnitte** zur Anwendung:



einstückig

zweistückig (Halbholz)

dreistückig

dreistückig

vierstückig (Kreuzholz) sechsstückig (Rahmen)

Abb. 2-8: Kantholzschnitte (Lohmann und Annies 1998)

Für Laubholzsägewerke, die Eisenbahnschwellen produzieren, kommen zudem die verschiedenen Varianten der **Schwellenschnitte** in Frage.



Baggerschwelle

einstückig

zweistückig

dreistückig

vierstückig

Abb. 2-9: Schwellenschnitte (Lohmann und Annies 1998)

Edel-, Spiegel- und Fladerschnitte gehören zu den Spezialschnitten und werden meist bei bestimmten Anforderungen oder Kundenwünschen angewendet.



Halbrift

Edelrft

Spiegelschnitt unbesäumt

Tangential-, Fladerschnitt

Abb. 2-10: Rift-, Spiegel- und Fladerschnitte (Fronius 1989a; Lohmann und Annies 1998)

2.3.4 Einschnittleistung und Schnittkapazität

Mit Hilfe der **Einschnittleistung** sind Aussagen zur Grösse von Sägewerken möglich. In Mitteleuropa erfolgt dies meist über den Rundholzverbrauch in Festmeter/Jahr. Eine andere Variante ist die Berechnung über die eingeschnittenen Festmeter pro Mitarbeiter und Jahr. Abhängig ist die Schnittleistung von technischen Parametern, den Eigenschaften des Rundholzsortimentes sowie wirtschaftlichen Aspekten (Tabelle 2-11).

Tab. 2-11: Einfluss verschiedener Parameter auf die Einschnittleistung (Fronius 1989a)

Technische Parameter	Wirtschaft	Rundholzsortiment
Vorschubgeschwindigkeit (m/min)	Wirtschaftskrise	Mittendurchmesser (m)
Wirkungsgrad	Konjunkturhoch	durchschnittliche Blocklänge (m)
Auslastung der Anlage, Verfügbarkeit der Schnitteinrichtung (Std/Jahr)		
Anzahl der Werkzeugwechsel		

Wie aus der Analyse der Schweizer Laubholzsägewerke (Lüthi 2010) hervorgeht, können Sägewerke der Schweiz mit einer Einschnittmenge von über 5.000 fm/Jahr als gross bezeichnet werden. Mit ca. 20.000 fm jährlich weist damit die Corbat Holding SA als grösster ansässiger Laubholzsäger eine verhältnismässig hohe Einschnittleistung auf. Ein Vergleich mit einem Nadelholzsäger soll die Unterschiede verdeutlichen: die Schilliger Holz AG schneidet im Jahr das über Zehnfache von ca. 250.000 bis 300.000 fm ein. Auch in anderen europäischen Ländern sieht es ähnlich aus. Eine Ausnahme bildet die deutsche Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, die mit einem jährlichen Buchenholzeinschnitt von 500.000 fm sogar die hiesigen Nadelholzsägewerke um mehr als das Doppelte übertrifft.

Die **Schnittkapazität** dagegen beschreibt nicht die tatsächlich erbrachte Leistung, sondern die Rundholzmenge in fm, die ein „Betrieb bei Vollauslastung seiner Betriebsanlage in einer normalen Jahresschicht (...) einzuschneiden vermag“ (Fronius 1989a). Unterschieden wird hierbei zwischen Maximal-, Optimal- und Mindestkapazität. Bei der maximalen Kapazität handelt es sich um die Leistungsfähigkeit der Maschine, die mit ihrer Geschwindigkeit den Produktionsprozess am meisten bestimmt, wie z.B. die Leistung der Blockbandsäge. Mengenmässig wird sie beeinflusst von:

- ◆ der Holzart
- ◆ der Schnittart (Einfach- oder Doppelschnitt, Spezialschnitte)
- ◆ dem mittleren Jahresmittendurchmesser des Rundholzes
- ◆ der Schnittgüte (Oberflächenbeschaffenheit der Schnittware) und
- ◆ der technischen Einrichtung des Produktionsbetriebes (Fronius 1989a).

Die Optimalkapazität wird nicht nur anhand der technischen Ausstattung bestimmt. In sie fliessen ebenso wirtschaftliche Aspekte mit ein, d.h. inwieweit ein Betrieb in der Lage ist, mit der zur Verfügung stehenden Technik eine bestehende wirtschaftliche Lage am ergiebigsten zu nutzen oder zu meistern.

Wichtig ist für Sägewerke, nicht unter die Mindestkapazität zu fallen, welche in Zeiten von Wirtschaftskrisen mitunter schnell erreicht wird. Sie gibt die Schnittmenge an, mit der Produktion noch wirtschaftlich ist.

Gesamtschweizerisch betrachtet wird die maximale Kapazität im Laubholzeinschnitt derzeit bei weitem unterschritten. Dieser liegt im Moment bei ca. 130.000 m³. Nach Lüthi (2010) könnten die Schweizer Laubholzsäger ca. 85.000 m³ pro Jahr zusätzlich verarbeiten; was ihnen fehlt, sind geeignete Absatzmärkte. Eine Mobilisierung der Branche ist daher unbedingt notwendig.

2.3.5 Möglichkeiten zur Optimierung der Verarbeitungstechnologie

Neue Technologien und auch Untersuchungen können dazu beitragen, die Verarbeitung zu vereinfachen oder zu optimieren, um Ausbeuten zu erhöhen und Einsparungen zu tätigen. Das wiederum wirkt sich positiv auf den Endpreis und damit auf die Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Materialien aus. Mitunter kann damit auch die Verarbeitung unüblicher oder gering genutzter Sortimente gefördert werden.

Buchen mit einem Farbkern, vor allem dem Rotkern, sind beispielhaft dafür zu nennen. Hapla und Ohnesorge (2005) untersuchten den Einfluss der Einschnittarten Rund-, Tangential- und Modellschnitt auf die Ausbeute von rotkerniger Buche und entwickelten daraus ein Kalkulationsmodell zu deren Simulation. Die Bedeutung dieser Untersuchung liegt darin, dass der Rotkern ein massgebliches Qualitätskriterium ist und den Stamm in die Güteklasse C fallen lässt. Da zudem die Schweizer Buche im Moment nur unzureichend genutzt wird, steigt nicht nur deren genereller Anteil im Wald, sondern auch die Wahrscheinlichkeit der Rotkernbildung. Das lässt vermuten, dass sich die Sägeindustrie zunehmend mit rotkerniger Buche und damit C-Qualitäten auseinandersetzen muss. Hapla und Ohnesorge analysierten dazu die in Sägewerken angewendeten Besonderheiten beim Einschnitt des rotkernigen Holzes sowie die anschliessende Sortierung des Schnittholzes. Besonderes Augenmerk lag auf der Einschnittart, der praktischen Schnittholzsortierung, dem Parameter für die Schnittholkalkulation und dem Einfluss auf Ausbeute und Erlös. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden die für das Modell notwendigen Kalkulationsparameter bestimmt. Grundlage der eigentlichen Kalkulation sind fiktiv herausgeschnittene Brettgrößen, die in die angepassten Güteklassen A/B, B/C und C eingeteilt wurden. Diese Güteklassen (Tabelle 2-12) beinhalten sowohl die kundenorientierte Sortierung der Sägewerke als auch die Anforderungen der europäischen Norm EN 975-1 (2009) für Buche und Eiche.

Tab. 2-12: Definition der Güteklassen und Angabe des Schnittholzpreises (Hapla und Ohnesorge 2005)

Schnittholz-Güteklasse	A/B	B/C	C
Rotkern-Beschränkungen je Brett	max. 20 % der Brettbreite	Einseitig mehr als 20 % der Brettbreite	beidseitig zulässig
kalkulierter Schnittholzpreis	400 EUR/m ³	220 EUR/m ³	100 EUR/m ³

Der gedachte Einschnitt erfolgte für den Rund- und Modellschnitt mit dem Vertikalgatter, für den Tangentialschnitt mit der Blockbandsäge (Abb. 2-12). Die Schnittholzausbeute wurde durch stufenweises Verändern des rotkernigen Anteils und der Brettstärke bestimmt. Für den Tangentialschnitt wurde zusätzlich eine Deckungsbeitragsrechnung durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- ◆ Sinkende Ausbeute an kernfreier A/B-Ware mit steigendem Rotkernanteil
- ◆ Schnittholzerlös vor allem durch Anteil an kernfreier A/B-Ware bestimmt
- ◆ B/C-Ware kann noch zu einem guten Preis verkauft werden und ist damit in der Lage, rotkernbedingter Verluste zu verringern (Abb. 2-11)

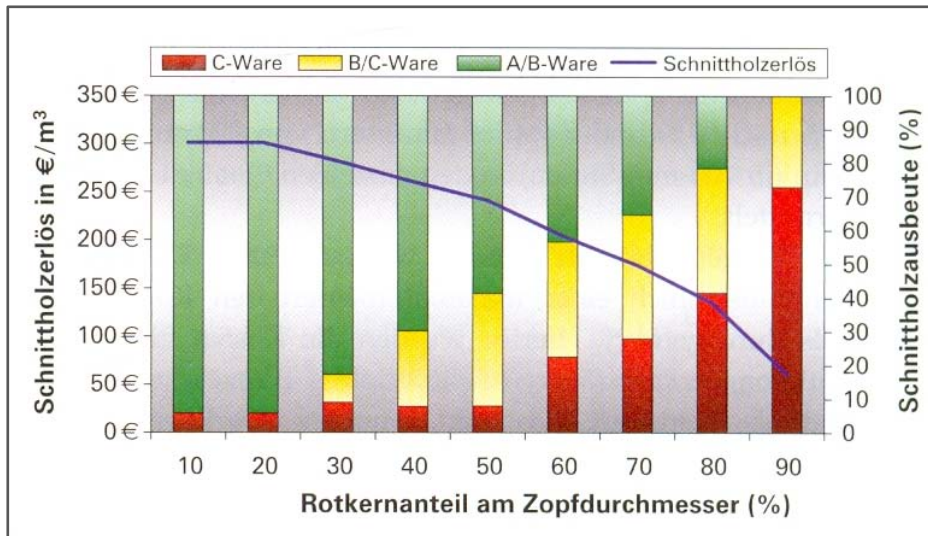


Abb. 2-11: Relative Ausbeute in der jeweiligen Schnittholzqualität und absoluter Gesamtschnittholzerlös für 1 m³ eingesetzten Stammholzes in Abhängigkeit vom Kernanteil am Zopfdurchmesser (Hapla und Ohnesorge 2005)

- ◆ Rotkernanteil <20 % → höhere Ausbeute an kernfreiem Brettern im Rundschnitt
- ◆ Rotkernanteil >20 % → höhere Ausbeute an kernfreien Brettern im Tangential- oder Modellschnitt
- ◆ Bis zu einem Kernholzanteil im Zopf zwischen 65–75 % werden die Produktherstellungskosten durch die Schnitterlöse im Tangentialschnitt mit der Blockbandsäge gedeckt (Wert jedoch abhängig von den Kostensätzen eines Sägewerks)

Einschnittart		Rundschnitt	Tangentialschnitt	Modellschnitt
Schematische Darstellung der Qualitätszonen beim Einschnitt von rotkernigen Buchenstämmen				
		■ A/B-Ware ■ B/C-Ware ■ C-Ware Schwarten/Restholz		
Einschnittaggregat:		Vertikalgatter	Block-Bandsäge	Vertikalgatter
Rel. Ausbeute an kernfreiem Schnittholz (%)*	20 %	80	75	73
	50 %	29	46	49
Gesamt-Schnittholzerlös (€/m³ Rohholz)*	20 %	321	304	295
	50 %	190	246	246
Schnittholz-Ausbeutediagramme (in %/m³ Rohholzeinsatz):				
* Angaben der Tabelle sowie der nebenstehenden Ausbeutediagramme für 20% und 50% Kernanteil am Zopfdurchmesser (inkl. 12% Schwundabzug) – orientiert an den Grenzen für Rotkern der „Rohholz-Güteklassen A und B [8]				

Abb. 2-12: Vergleich der Kalkulationsergebnisse nach Einschnittart (Hapla und Ohnesorge 2005)

Auch maschinentechnische Beispiele zeigen, inwieweit sich die Verarbeitung beeinflussen lässt. So schneidet eine von der Meyer AG (CH) entwickelte CNC-Maschine Bretter oder Friese nicht gerade heraus, sondern passt die Schnitte der natürlich gewachsenen Form des Baumes an. Dies bietet sich vor allem für zu verleimende Platten wie Massivholzplatten an. Es werden dabei je zwei Friese immer mit der genau gleichen Schnittlinie versehen, was zu idealen Fugen führt. Grosser Vorteil bei diesem Verfahren sind Ausbeuteerhöhungen von 10 bis 40 %. Zudem lässt sich dadurch die gewohnte Oberflächenoptik ändern. Anders als bei geradlinigen Schnitten durch die Holzstruktur, bleiben die Fugen durch die Wahrung der Wuchsform so gut wie unsichtbar. Gerade für liegende und sichtbare Oberflächen bietet sich das Verfahren für einzigartige Oberflächen an, zumal jedes Objekt eine andere Aussenkontur.

Der Simon-Möhringer-Anlagenbau entwickelte mit dem „Autojet Rip“ eine Zuschnittlinie für Laubholz. Die sechs modular einsetzbaren Elementen sorgen für eine hohe Flexibilität, Qualität und Ausbeute:

1. beidseitige Laservermessung der Brettkontur
 - Bestimmung der verfügbaren Nutzfläche
 - Erkennen von Rissen
2. Brettoptimierung für den Zuschnitt mit Laser-Schnittbildprojektoren
 - Vorschlag des Computers für die beste Bretteinteilung und Projizierung der Schnittlinien auf das Brett
3. Ausrichten am Hochleistungstisch
 - ermöglicht das Ausrichten von gekrümmten Brettern auf die ideale Schnittlinie
4. Kreissägenaggregat
 - Genaue Führung des Schnittguts bei minimalen Anpressdruck durch ein Kettenbett vor und hinter den Kreissägen und durch einstellbare gummierte Rollen
 - Einstellen jeder beliebigen Schnittbildkombination durch zwei bis sechs Sägeflansche
 - Schall- und Staubisolation durch Schutzkabine um das Sägeaggregat
5. Spaltkeilfreies Trennsystem
 - automatische Trennung von Spreisseln und Gutteilen sowie Trennung der Gutteile im gleichen Arbeitsgang in drei unterschiedliche Qualitäten
6. Halbbrett-Rückführung
 - erzeugtes Halbbrett wird automatisch zurückgeführt und erneut vermessen

Blockbandsägen werden ebenso technisch weiterentwickelt. Sogenannte Tandem-Blockbandsägen des Unternehmens EWD ermöglichen die Bearbeitung verschiedener Schritte nacheinander in einem Durchgang. Der Bandsäge sind Besäum- oder Nachschnittanlagen vor- bzw. nachgeschaltet. Für das Modell EBB 1800 VR/2 + PF 19 (= Tandem-Blockbandsäge mit Vor- und Rückwärtsschnitt und Profilspanner), welches zusätzlich mit einer flexiblen Doppelwellenkreissäge und automatischer Besäumanlage ausgestattet ist, gibt EWD für Starkholz eine jährliche Einschnittkapazität von 50.000 fm pro Schicht an. Moderne Anlagen sind wartungsärmer, schneller und besitzen einen hohen Bedienkomfort. Durch geneigte Sägeständer rollen die Stämme von selbst auf den Blockwagen, was eine raschere Beschickung ermöglicht. Mitarbeiter können effizienter eingesetzt werden, da entsprechende Anlagen in der Lage sind, die Stämme zu vermessen und Schnittbilder vorzuschlagen. Zudem tragen verbesserte Blattführungen und höhere Vorschübe zu höheren Einschnittleistungen und Schnittqualitäten bei.

Doch auch werksinterne Produktionsschritte können die Ausbeute beeinflussen. Die Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG nutzt dafür vor allem die Möglichkeiten der Sortierung. Die

Stämme werden nicht vorsortiert, sondern das Holz wird nach dem Einschnitt noch im Sägewerk vorgeschliffen und anschliessend visuell und maschinell sortiert. Dem Käufer kann es damit nicht passieren, etwaige Holzfehler erst bei der Bearbeitung zu entdecken, da die Sägerei bereits im Werk in der Lage ist, anwendungsorientierte Sortimente gleicher Qualität zu erstellen.

2.4 Struktur der Säge-, Zellstoff- und Holzwerkstoffindustrie

2.4.1 Derzeitige wirtschaftliche Situation

Die aktuelle Wirtschaftssituation im Zusammenhang mit der Finanzkrise hatte in der Schweiz vor allem einen Einfluss auf den Export. Die damit einhergehende Abwertung des Euro im Vergleich zum Schweizer Franken hatte zur Folge, dass Schweizer Exporte in den EU-Raum teurer und damit weniger konkurrenzfähig wurden. Gerade die Aussenwirtschaft ist für die Schweiz jedoch wichtig, da sie ausser Wasser keine weiteren Bodenschätze besitzt. Das verdeutlicht die Stellung des Holzes als eine der wichtigsten Ressourcen des Landes. Der Holzexport, vor allem von unverarbeitetem Stammholz, besitzt einen Anteil von 2 bis 3 % am gesamten Aussenhandel. Importiert werden mit 4 bis 5 % kostenintensive Halb- und Fertigprodukte, die oft aus dem vorher exportierten Holz gefertigt wurden. Die negative Handelsbilanz ist zudem eine Folge der hohen Ansprüche der Schweiz durch die Einfuhr von qualitativ hochwertigem Laubholz wie Buchen- und Eichenrundholz. Aus den Daten der LFI 3 wird allerdings deutlich ersichtlich, dass gerade der Import von Laubholz reduziert werden könnte, indem auf einheimische Vorräte zurückgegriffen wird. Besonders die Buche besitzt ungenutztes Potential. Gegen sie spricht der in der Schweiz verbreitete Farbkern. Untersuchungen bestätigen jedoch, dass dieser durch eine geeignete thermische Behandlung egalisiert werden kann (Oelhafen 2005).

Den wirtschaftlichen Abschwung erleben die einzelnen Branchen unterschiedlich. Vor allem die Forstbetriebe verkünden eine geringere Nachfrage und sinkende Preise für Rundholz. Viele Betriebe der Holzverarbeitenden Industrie halten ihre Vorräte im Moment zurück in der Hoffnung auf Preisstabilisierungen und -erhöhungen. Laut einem Artikel des Holz-Zentralblattes (Anonymus 2009b) läuft der Ein- und Verkauf von Papierholz gut, allerdings leidet die Papierindustrie unter dem Nachfragerückgang und den steigenden Energiepreisen. Auch die Sägeindustrie meldet einen geringeren Bedarf im Vergleich zum letzten Jahr. Trotz der Schliessung des Zellstoffwerkes Borregaard Schweiz AG blieb der Absatz des Industrie- und Restholzes des Rundholzhandels bisher relativ unbeeindruckt von der Rezession. Grund dafür ist die zunehmende Wiederentdeckung der energetischen Nutzung, so dass vor allem Heizanlagen und Biomassekraftwerke die Abnahme sicherten. Allerdings spüren kleinere bis mittelgrosse Sägewerke die Einstellung der Produktion bei der Borregaard AG erheblich, da dadurch einer der grössten Abnehmer wegfiel. Als problematisch sehen Händler zudem die Nachfrage nach Buchen- und Hartlaubholz, woraus deutlich wird, dass die Wald- und Holzwirtschaft noch nicht auf einen steigenden Vorrat eingestellt ist.

2.4.2 Grösse und Kapazitäten von Laubholzsägewerken

Die meisten Sägewerke der Schweiz sind spezialisiert auf Nadelhölzer. Der Einschnitt von Laubholz ist verbunden mit einer aufwendigeren Sortierung und langsameren Verarbeitung, was zur Folge hat, dass die Produkte teurer sind als gleichwertige aus Nadelholz. Der Bedarf kann jedoch bald nicht mehr alleine durch Nadelholz gedeckt werden, da auch steigende

Erdöl- und Rohstoffpreise sowie Forderungen nach einer nachhaltigen Entwicklung die Nachfrage ankurbeln.

In der Schweiz existieren bislang nur wenige Laubholz verarbeitende Sägewerke, wobei die Unternehmensgruppe Corbat Holding SA in Vendlincourt an der französischen Grenze das grösste mit einem ungefähren Einschnitt von 20.000 fm pro Jahr unterhält. Die Hälfte des Einschnittes besteht aus Buche, ein Drittel aus Eiche, den Rest bilden hauptsächlich Esche, Ahorn, Kirsch- und Nussbaum. Das Unternehmen kauft sein Holz in einem Umkreis von 50 km. Aufgrund der grenznahen Lage wird das Holz sowohl aus der Schweiz als auch aus Frankreich bezogen, wobei vor allem die Qualität entscheidet. Geringwertige Buche, geeignet z.B. für Schwellen, stammt meist aus der Schweiz. Sogenannte mildes Buchenholz, d.h. gleichmässig, ruhig gewachsene Stämme ohne Spannungen, und auch Eichenholz bezieht die Corbat Holding SA aufgrund einer anders ausgeführten Forstpolitik in Frankreich. Das Unternehmen schneidet auch rotkernige Buche ein. Nach Aussage von Corbat (2010) geht dieses Holz vor allem an Halbfabrikat- und Möbelhersteller. Übrig gebliebene Schwarten werden gebündelt und an Holzwerkstoff- oder Zellstoffhersteller verkauft. Hackschnitzel werden vor allem zur eigenen Energieversorgung genutzt, aber auch an Holzheizkraftwerke verschickt. Ein zweites Standbein schuf sich die Sägerei mit einer Pelletanlage, eine Möglichkeit der Energiegewinnung insbesondere für Privathaushalte.

Ein weiteres nennenswertes Laubholzsägewerk ist die Hanhartholz AG mit Sitz in Diessenhofen an der Grenze zu Deutschland, die Laubhölzer in sämtlichen Dimensionen einschneidet. Zudem können noch die Koller Sägerei AG, die Ruedersäge AG, die Konrad Keller AG, die Richard Lötscher AG, die Krähenbühl Holz GmbH, die A. Bachmann`s Söhne AG sowie die Hess & CO. AG genannt werden. Einige weitere Sägereien verarbeiten Laubholz nur in Kleinstmengen oder auf Anfrage.

Mit „AvantiBOIS“ soll allerdings in naher Zukunft ein Laubholzverarbeitungszentrum für die Wälder der Kantone Waadt, Freiburg, Neuenburg und Bern geschaffen werden. Das Ziel des von Vertretern der Politik, des Waldes, der Wirtschaft und der Kantonsverwaltungen gegründeten Projektes ist nach der Erschliessung der Basisinfrastruktur mit 15 – 20 ha Land die Ansiedelung von Unternehmen im Holzcluster. Die genaue Standortwahl ist noch nicht geklärt, in Frage kommen Grandson und Moudon. Nach „AvantiBOIS“ bieten beide durch ihren Laubholzvorrat und die günstige Strassen- und Schienenanbindung ideale Voraussetzungen.

Dass es möglich ist, mit Laubholz erfolgreich in grossen Massstab zu arbeiten, zeigen die Firmen Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG (Creuzberg, Deutschland) und die Abalon Hardwood GmbH (Heiligenkreuz/L., Österreich). Pollmeier verarbeitet jährlich ca. 500.000 m³ Buche zu hochwertigen Sortimenten, täglich werden mindestens 800 m³ Schnittholz produziert. Neben dem Maschinenpark verfügt das Unternehmen auch über 100 Trocknungs- und Dämpfanlagen. Abalon schneidet mit verschiedenen Bandsägen jährlich um die 250.000 m³ Laubholz verschiedener Art ein; das Hauptaugenmerk liegt allerdings auch auf Buche.

2.4.3 Verarbeitungs- und Kapazitätsmengen der Zellstoff- und Holzwerkstoffindustrie

Die Laubholz-Verarbeitungsmengen sind regional abhängig und werden u.a. bestimmt von der Verfügbarkeit, den Stammqualitäten und der Konkurrenz im Ausland.

Zellstoffindustrie: In der Schweiz ist die Herstellung von Zellstoff durch die Schliessung der Borregaard Schweiz AG zusammengebrochen. Die 2002 gegründete Firma entstand durch die Übernahme der ehemaligen Cellulosefabrik Attisholz AG durch Borregaard. Das Werk musste im September 2008 schliessen, da sich die Produktion wegen deutlich gestiegener Energiepreise und starker Preis- und Absatzeinbrüche nicht mehr rentierte. Besonders die Waldwirtschaft bedauerte diesen Schritt, da doch die Borregaard Schweiz AG einer der bedeutendsten Abnehmer für Industrieholz war. Der jährliche Nadelholzanteil betrug ca. 600.000 m³, Laubholz wurde immerhin in Mengen um die 100.000 m³ verarbeitet. Die Herstellung von Buchenzellstoff wurde allerdings schon vor der Schliessung eingestellt, da die Konkurrenz des günstigeren Eukalyptuszellstoffes zu stark war. Deutlich sichtbar wird die Einstellung bei Betrachtung der Produktionszahlen. Wurden 2007 noch 109.000 t Zellstoff erzeugt, waren es 2008 nur noch 72.000 t. Die Schweiz ist damit gezwungen, mehr zu importieren, um den eigenen Bedarf von durchschnittlich 530.000 t zu decken. Kapazitäten heutiger Werke liegen mitunter, wie z.B. in Südamerika, bei 1.000.000 t/Jahr. Die grössten Werke in Europa sind die Zellstoff Stendal Holz GmbH (Kapazität: 620.000 t/Jahr), Stora Enso und Södra in Skandinavien. Södra geben auf ihrer Internetseite sogar eine Produktionsmenge von 2.000.000 t Zellstoff pro Jahr verteilt auf fünf Standorte an.

Holzwerkstoffindustrie: Die Holzwerkstoffindustrie ist nach wie vor der grösste Abnehmer und Verarbeiter von Holz. Mit einem Produktionsvolumen von 40,1 Mio.m³ im Jahre 2008 ist die Spanplatte mit 61 % dominierend unter den Holzwerkstoffen in Europa. Auch in der Schweiz führte sie die Produktion mit 540.000 m³ im Jahre 2007 an. Derzeit werden den Spanplatten auch Laubhölzer beigemischt. Die Buche ist auch hier die meistverwendete Holzart. Die Kronospan Schweiz AG, einer der wichtigsten Holzwerkstoffhersteller der Schweiz, verarbeitet jährlich ca. 850.000 m³ Holz, davon immerhin 40 % Laubholz bei einem ungefähren monatlichen Verbrauch von 5.000 – 20.000 m³, meist Buche (Howald 2009a, 2009b). Der durchschnittliche Anteil an Laubholz des österreichischen Holzwerkstoffherstellers Fritz Egger GmbH & Co. lag 2008/2009 mit 8 % deutlich darunter. Das liegt aber auch daran, dass nach Angaben des Unternehmens viel Laubholz aus der Schweiz bzw. Süddeutschland importiert werden musste (Karbun 2009).

In Faserwerkstoffen dagegen wird derzeit in der Schweiz beinahe kein Laubholz eingesetzt, obwohl wissenschaftliche Beiträge eine Eignung bestätigen. Gerade hier wäre ein hohes Potential möglich, denn mit 534.000 m³ wiesen Faserplatten im Jahre 2007 in der Schweiz nach den Spanplatten die zweithöchste Produktionsmenge unter den Holzwerkstoffen auf. Grösster Anbieter ist die Pavatex SA, die, ausgehend von einer mittleren Rohdichte von 200 kg/m³, jährlich ungefähr 300.000 m³ Faserplatten produzieren.

Die Span- und Faserwerkstofftechnologie wird in Europa, aber auch weltweit vor allem von einigen grossen Unternehmen geprägt, die zunehmend den Markt beherrschen. Kleinere Unternehmen können dem Druck häufig nicht standhalten, ihnen bleibt oft nur die Übernahme durch ein grosses Werk. Die folgenden zwei Darstellungen (Abb. 2-13 und 2-14) stellen die europa- und weltweit wichtigsten Firmen mit ihren jeweiligen Produktionskapazitäten vor. Einige Unternehmen unterhalten in Europa und weltweit Standorte. Daher kann es sein, dass die Produktionskapazitäten in den zwei Grafiken unterschiedlich sind.



Abb. 2-13: Produktionskapazitäten (in Mio.m³) der grössten Holzwerkstoffhersteller in Europa, ausschliesslich europäische Standorte (Sonae Indústria)

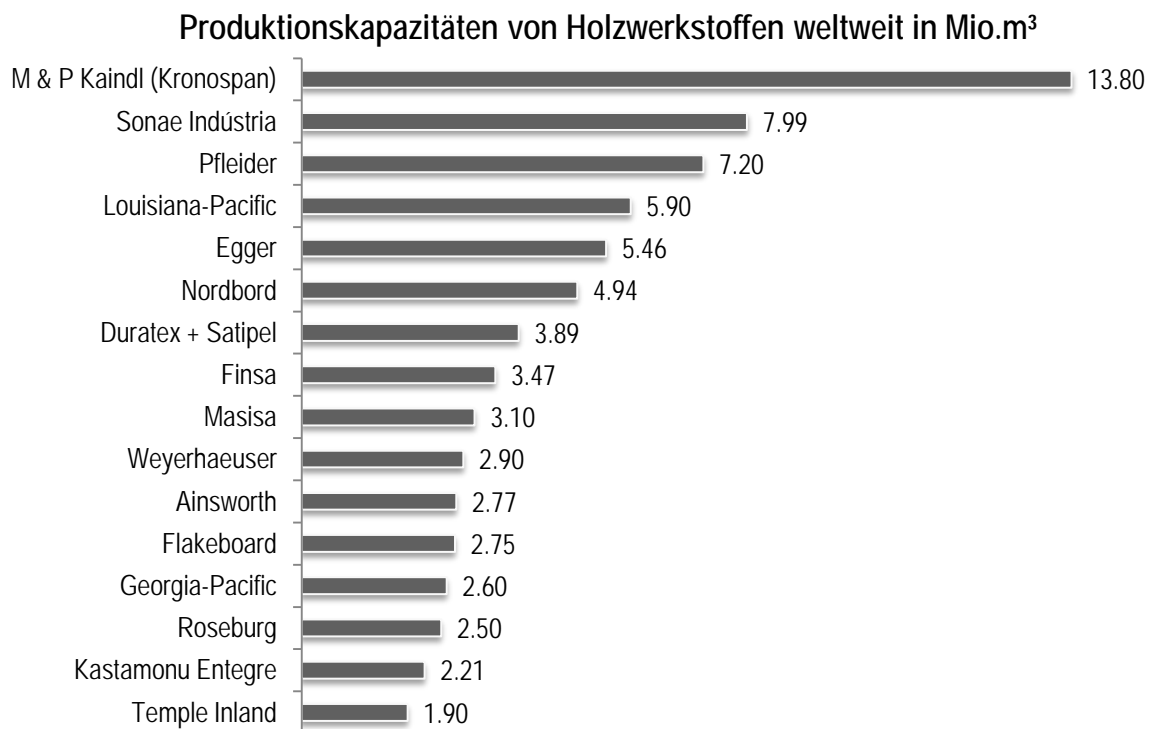


Abb. 2-14: Produktionskapazitäten (in Mio.m³) der grössten weltweiten Holzwerkstoffhersteller (Sonae Indústria)

3 VERWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

3.1 Vollholzprodukte

Im Bereich der Vollholzprodukte hat die Verwendung von Laubholz eine lange Tradition. In einigen Bereichen ist Laubholz sogar Rohstoff Nummer eins. Ein aufmerksamer Blick durchs Leben offenbart mitunter überraschende oder kaum mehr wahr genommene Einsatzgebiete, da sie zum Alltag gehören. Oft handelt es sich um Nischenanwendungen oder spezielle Produkte. Im Lauf der Jahrhunderte nahm der Einsatz von Vollholz aus verschiedenen Gründen ab. Aufgrund seiner charakteristischen Eigenschaften (z.B. Quell- und Schwindverhalten) und natürlich auch der begrenzten Baumabmessung ist eine Bearbeitung nur bis zu bestimmten Dimensionen möglich. Die Entwicklung von Holzwerkstoffen löste dieses Problem. Neue Produktentwicklungen (Kunststoffe, Verbundwerkstoffe) trugen und tragen zu dieser Abnahme bei. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über veraltete, aktuelle, zukünftige, aber auch weitere denkbare Einsatzgebiete von Laubvollholz.

3.1.1 Holz- und Ingenieurholzbau

Dachstühle/Deckenbalken/Fachwerke

Die Entwicklung von Holzwerkstoffen erlaubte eine Erweiterung der Möglichkeiten im konstruktiven Holzbau bezüglich Dimensionen und Stabilität. Reines Laubvollholz ist daher beinahe nur noch in älteren Gebäuden zu finden, war jedoch aufgrund seiner guten mechanischen Eigenschaften ein bevorzugtes Material. Vor allem Eichenholz wurde für Fachwerke und Deckenbalken genutzt. Häuser dieser Art stehen heute vorwiegend unter Denkmalschutz und werden als Zeitzeugen der Zeit aufwendig restauriert. Die Bausubstanz wird soweit möglich erhalten, mitunter müssen jedoch einzelne Balken ersetzt werden. Spezielle Hobelmaschinen geben dem Holz ein gebrauchtes, der damaligen Werkzeugausstattung angepasstes Aussehen. Aus Gebäuden, deren Zustand zu schlecht ist, werden die Balken mitunter vorsichtig geborgen und zum Wiederverkauf angeboten.



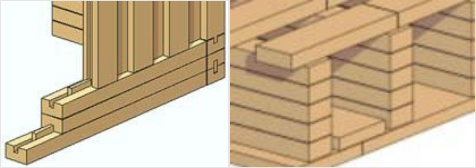

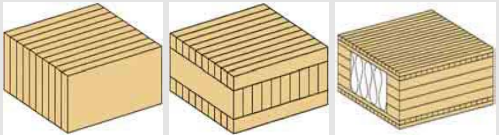


Abb.3-1: Blick in den Dachstuhl des Spittelturmes von Bremgarten mit Balken aus Eiche (Verena Krackler)






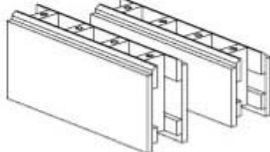
Massivholzbauten

Fachwerke nach der oben vorgestellten Art werden heute fast nicht mehr hergestellt. Im Laufe der Jahrzehnte entwickelte sich jedoch die Massivholzbauweise oder Skelettbauweise, welche heute durch unterschiedlichste Systeme repräsentiert wird. Die Wahl der Form des Vollholzes hat hierbei einen entscheidenden Einfluss auf die äusseren und technischen Eigenschaften. In der Skelettbauweise haben sich zum Holzrahmenbau (Tragwerk aus vorgefertigten Holzrahmen) und Holztafelbau (Baukörper modular aus einzelnen Holztafeln) etabliert. Massivholzbau zeichnet sich durch die Vorfertigung von Wand-, Decken- und Dachelementen aus. Die dafür verwendeten Leisten, Platten oder Bretter werden verleimt oder mit Holzdübeln oder Nägeln verbunden. Der Übergang zu den Holzwerkstoffen ist mitunter fliessend. Besonders in der Schweiz, Deutschland und Österreich wurden von Holzbauunternehmungen in den letzten Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme entwickelt; die nachfolgende Tabelle 3-1 gibt einen Überblick.

Tab. 3-1: Massivholzbausysteme (Hamm und Höltschi 2005): Erne AG Holzbau, Holzhäuser Esterbauer, Gisler Holzbau, Kaufmann Oberholzer, Lignotrend Produktions GmbH, Nägeli AG, Plus Schuler AG, Sägerei Sidler AG, Schmidlin Holzbau AG, Steko-Holzbausysteme AG, Tschopp Holzbau AG

Produktname	Unternehmen	Aufbau	Anwendung	Holzarten	Bild
Ökomodul Bresta	Tschopp Holzbau AG	hochkant nebeneinandergestellte, verdübelte Brettlamellen	Aussen- und Innenwände, Geschossdecken, Dachelemente, Balkone	Fichte, Tanne, Lärche, Douglasie, Kiefer, Ahorn, Nussbaum	
Optiholz	Sägerei Sidler AG, Kaufmann Oberholzer	hochkant nebeneinandergestellte, verdübelte Brettlamellen	Aussen- und Innenwände, Geschossdecken, Dachelemente	Fichte, Tanne, Lärche, Douglasie, Kiefer, weitere auf Wunsch	
Ligno-Swiss	Schmidlin Holzbau AG	Wand: verdübelte Massivholzbohlen, ringsum genutet Decke: Dreischicht-Massivholzplatte + verleimte Holzbalken + Querlatten	Wand- und Deckenelemente	Fichte, Tanne	
Appenzellerholz	Nägeli AG	Vollholzelemente in Tafelbauweise: gedübelte Bretter kreuzweise und diagonal aufeinandergelegt, äusserst dicke Elemente	Wände, Geschossdecken, Dächer	Fichte, Tanne	
Schuler-Blockholz	Plus Schuler AG	Stab- und Plattenform, im Blockverfahren hergestellte Brettschichtholzelemente mit feiner Lamellenstruktur	Aussen- und Innenwände, Geschossdecken, Dachelemente, Türen, Möbel	Fichte, Tanne, Douglasie, Lärche	 einschichtig dreischichtig fünfschichtig

Fortsetzung Tab. 3-1:

Produktname	Unternehmen	Aufbau	Anwendung	Holzarten	Bild
Suprafloor (Holz-Beton- Verbundsystem)	Erne AG Holzbau	Kombination von Holz und Beton mittels Schubverbinder	Aussenwände, Geschossdecken, Dachelemente, speziell für mehrgeschossige Bauten	Fichte, Tanne, Lärche, Douglasie, Kiefer	
Lignotrend	Lignotrend Produktions GmbH	kreuzweise Verklebung von Nadelholzschichten	Aussen- und Innenwände, Geschossdecken, Dachelemente	Fichte, Tanne, Lärche	
WOOD MEGA THERM®	Holzhäuser Esterbauer	Wand: Holzleisten, Holzweichfaserelemente und Lehmbauplatte; Decke: Holzleiste, Holzweichfaserplatten, Kiesschüttung, Estrichziegel	Wand- und Deckenelemente	Nadelhölzer	
Lignatur®	Lignatur AG	Schalen-, Flächen- und Kastenelemente, Hohlräume ausfüllbar	Dach- und Deckenelemente	Nadelhölzer	
Gisler Holzhaus System	Gisler Holzbau	Kastenelemente aus vollen Brettlamellen und innenliegenden geschlitzten Lamellen	Wand- und Deckenelemente	Nadelhölzer, geschlitzte Lamellen auch aus Buche	
Steko	Steko-Holzbausysteme AG	Baukastenprinzip: einzelne Elemente zum Zusammenstecken	Aussen- und Innenwände, Geschossdecken, Dachelemente, Türen, Möbel	Fichte, Tanne	

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, nutzen alle aufgeführten Unternehmen Nadelhölzer, insbesondere Fichte und Tanne, aber auch Kiefer, Douglasie und Lärche als Grundlage. Einige Firmen bieten auf Wunsch weitere Hölzer an. Die Tschopp Holzbau AG weist auf ihrer Internetseite auch auf die Verwendung von Laubhölzern hin. Gisler Holzbau entwickelt derzeit für seine geschlitzten Elemente auch Varianten aus Buche. Vorteile gerade von Hartlaubhölzern wären höhere Festigkeiten oder gleiche Festigkeiten bei einer filigraneren Bauweise sowie stabilere Verbindungen. Es wird allerdings unmöglich oder schwer sein, Nadelhölzer komplett zu ersetzen, da mit ihnen ebenso hochwertige Qualitäten zu einem niedrigeren Preis möglich sind. Im Moment werden meist lediglich die als Verbindungsmittel dienenden Dübel aus Eiche oder Buche hergestellt. Dass mit Buche als Konstruktionselemente mehrgeschossig gebaut werden kann, beweist das Projekt „Woodstock“. Dieses dreigeschossige Gebäude im Minergie-P-Standard besteht aus Wand- und Deckenelementen aus Buche, entwickelt von dem Holzbauingenieur Hermann Blumer. Der Prototyp, bestehend aus 45 m³ Buchenholz, wurde Anfang 2010 erstmalig an der Swissbau in Basel vorgestellt.

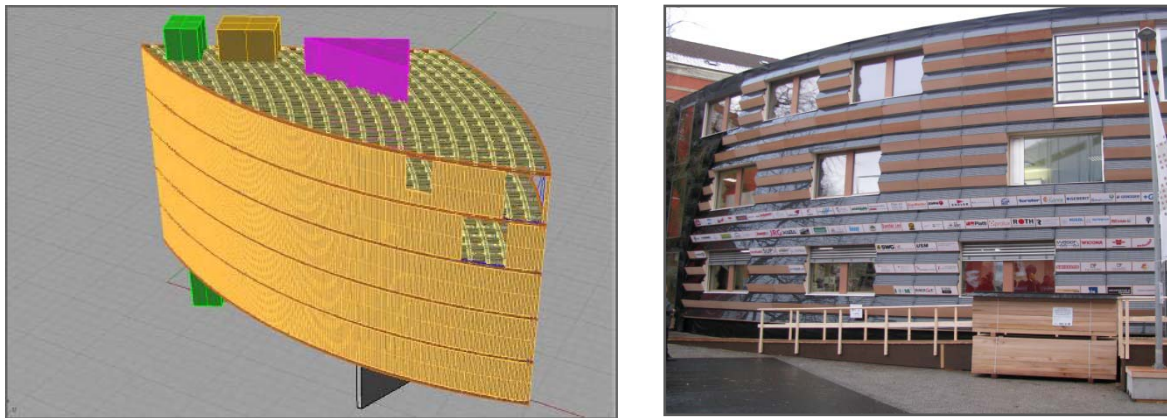


Abb. 3-2: Tragende Struktur und Aussenansicht von Woodstock (www.woodstock-basel.ch; Verena Krackler)

Eine weitere Variante, Holz aus dem Schweizer Mischwald für Bauzwecke zu nutzen, wendet das Architekturbüro bernath+widmer in Zusammenarbeit mit weiteren Fachleuten (Herrmann Blumer, Michael Koller, Bergauer Holzbau GmbH, Heiri Bühler) an. Rundholzstämmen werden auf die ungefähre spätere Balkendimension vorgesägt und anschliessend in Längsrichtung durchbohrt, um den Kern zu entfernen. Vorteile dieser Vorgehensweise sind eine schnellere Trocknung, die Möglichkeit Zugstangen in die Bohrlöcher einzuziehen und, für die Schweizer Laubholzsituation von grosser Bedeutung, auch kleinere Rundholzdurchmesser als Bauholz einsetzen zu können. Zudem weisen die Balken weniger Schwindrisse auf und lassen sich leichter bearbeiten. Mit auf diese Weise gefertigten Eichenbalken (Dimension 20 x 20 cm) wurde im schaffhauserischen Büttlenhardt ein Tragwerk für ein Ferienhaus errichtet. Ausgefacht wurde die Konstruktion mit Bohlen aus Föhre. Für innere Deckenbalken und Verkleidungen wurde beide Holzarten kombiniert. Die äussere Konstruktion entspricht einem schon im 17. Jhd. angewendetem Bohlenständerbau. Angepasst an die heutigen Standards werden die energetischen Anforderungen an Minergie-P ohne weiteres erfüllt.



Abb. 3-3: Ferienhaus Büttenhardt mit angebohrten Tragbalken aus Eiche, Architektur: bernath+widmer (Roland Bernath)



Abb. 3-4: Angebohrte Eichenbalken und Verbindungsecke des Ferienheims Büttenhardt, Architektur: bernath+widmer (Roland Bernath)

Brückenbauten

Ein imposantes Beispiel für die Verwendung von Eichenholz ist der Fussgänger-Holzsteg zwischen den Ortschaften Rapperswil und Hurden über den Zürichsee. Mit einer Länge von 841 m handelt es sich um die längste Holzbrücke der Schweiz, bei der mit Ausnahme einiger Konstruktionselemente ausschliesslich Holz verwendet wurde. Insgesamt wurden 415 m³ unbehandeltes Eichenholz verbaut, unter denen sich 233 Pfähle mit Längen von 7 bis 16 m und Durchmessern von 36 bis 70 cm befinden. Dem Material der 2,40 m breiten Brücke wird eine Lebensdauer von 50 bis 70 Jahren vorausgesagt.

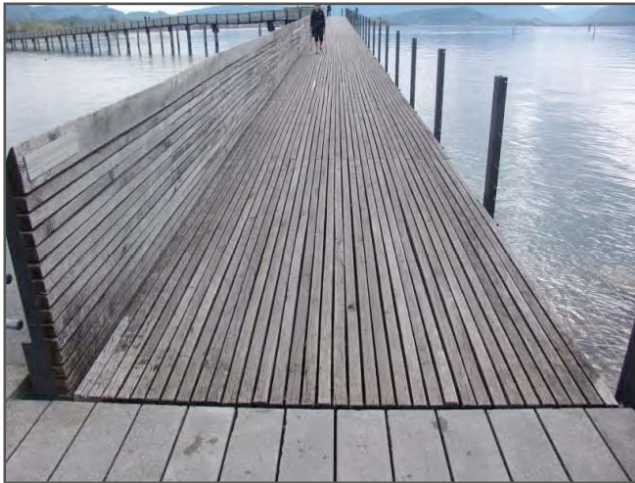


Abb. 3-5: Fussgänger-Holzsteg aus Eichenholz zwischen Rapperswil und Hurden über den Zürichsee (Daniel Keunecke)

Spielplätze

Holzspielplatzgeräte fordern vor allem ein Material mit einer hohen Resistenz, um Witterungseinflüssen stand zu halten. Ideal geeignet ist Robinienholz, das sich auch durch eine ausserordentliche Härte und Zähigkeit auszeichnet. Ebenso eignen sich Eiche und Edelkastanie. Nach Imprägnierung oder Modifizierung können auch weniger resistente Hölzer eingesetzt werden. Weit verbreitet ist der Einsatz von Holzschutzmitteln, jedoch ist auch die thermische Behandlung geeignet (Scheidung et al. 2007). Wärmebehandeltes Buchen- und Eschenholz erwies sich als sehr dauerhaft bis dauerhaft und somit tauglich für Spielplatzgeräte (siehe 3.3.3 „Thermische Modifizierung“).

Industrieholzböden/Industrieparkett

Böden für Produktionshallen, Lagerhäuser, Labore, Supermärkte sowie öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Sporthallen und Kindergärten sind hohen mechanischen und chemischen Beanspruchungen ausgesetzt. Hölzerne Varianten sind unter dem Namen Industrieparkett bekannt. Es handelt sich hierbei um Hochkantlamellenparkett mit hoher Robustheit und Strapazierfähigkeit, die auf einer Trägerplatte befestigt werden. Interessanterweise wird hier zumeist anfallendes Restholz aus der Mosaikparkettproduktion verwendet. Durch die Hochkantanordnung nimmt die Dicke der Nutzschicht zu; der Boden kann mehrere Male zu Renovierungszwecken abgeschliffen werden. Geeignet sind vor allem Hartlaubhölzer wie Eiche und Buche. Hier bietet sich eine ideale Absatzmöglichkeit für rotkernige Buche.

Holzfassaden

Holzfassaden können sowohl Systeme aus Vollholz in Form von Schindeln, Platten oder Profilen als auch Verbundwerkstoffe mit Anteilen aus Holz sein. Diese können senkrecht oder waagrecht angeordnet sein. Die wohl älteste Ausführungsart ist die Blockbauweise, bei der Baumstämme aufeinander geschichtet werden. Die Bandbreite der Geometrien reicht von rechteckigen Leisten bis hin zu Schindeln.

Fassadenschindeln: Schindeln können als Fassaden- sowie als Dachverkleidung dienen. Angefertigt und verbaut wurden sie meist in holzreichen Gebieten, wo sie vor allem im Winter Zeitvertreib und Verdienstmöglichkeit gleichermaßen waren. Hierzu wurden

vorwiegend regionale Holzarten genutzt, so dass ein Einsatz von Laubhölzern (insbesondere Buche und Eiche) sich hier anbot. Besonders im deutschen Bundesland Hessen wurden Buchenschindeln, in Norddeutschland Eichenschindeln verbaut. Für den Erhalt dieser Fassaden sorgen wenige Schindelhersteller, wie z.B. die Theo Ott GmbH in Süddeutschland. Die geringe Dauerhaftigkeit der Buche erfordert einen entsprechenden Holzschutz, bei Eiche kann aufgrund des hohen Anteils an Gerbstoffen darauf verzichtet werden.

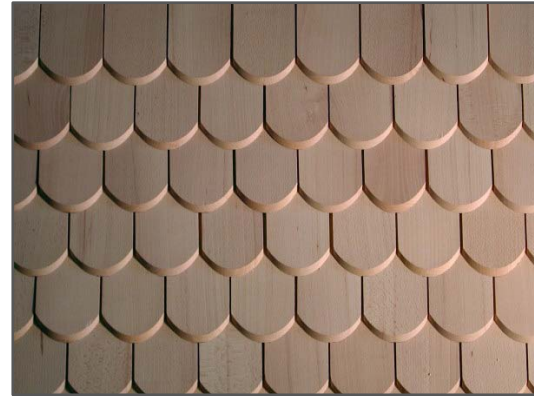


Abb. 3-6: Fassadenschindeln der Firma Theo Ott GmbH, links: Eiche, rechts: Buche (www.holzschindeln.de)

Im Gegensatz zu grossflächigen Fassadensystemen werden Schindeln derzeit etwas zurückhaltender verwendet, obwohl sich mit ihnen äusserst individuelle, architektonisch hochwertige Hüllen schaffen lassen. Dies hat der Architekt Lord Norman Forster bewiesen, der in St. Moritz das Ferienhaus „Chesa Futura“ in Nieren-Form mit Holzschindeln aus Lärche errichten liess. Forster zeigt damit, dass mit Holzschindeln auch schwierige und extravagante Formen realisierbar sind.



Abb. 3-7: Ferienhaus „Chesa Futura“ des Architekten Lord Norman Forster (www.arqhys.com und www.linternaute.com)

Profile und Platten: Laubhölzer spielen hier eine untergeordnete Rolle, überwiegend werden Lärche, Douglasie und Tanne eingesetzt. Derzeit werden vorgewitterte Profilbretter stark nachgefragt, welche als Teil des Bearbeitungsprozesses für eine bestimmte Zeit UV-Licht, Feuchtigkeit und mitunter bestimmten holzverfärbenden Pilzen ausgesetzt werden. Die dadurch hervorgerufene Vergrauung minimiert spätere Farbunterschiede aufgrund von Bewitterung. Anbieter solcher Bretter sind u.a. die aus der Schweiz stammende Schilliger Holz AG mit ihrem Produkt bioood® sowie die deutsche Holzwerk Langenorla GmbH. Der Produktbeschreibung der Schilliger Holz AG ist zu entnehmen, dass die Oberfläche des

patinierten Holzes dem Aussehen einer sechsjährigen dem Schlagregen ausgesetzten unbehandelten Fassade entspricht. Die Dauerhaftigkeit bleibt erhalten. Interessant könnten solche Profile allerdings auch im Innenbereich für dekorative Zwecke sein, eine ideale Variante für nicht dauerhafte Hölzer wie die Buche.

Für Aussenanwendungen ist vor allem die Eiche geeignet, jedoch ist sie gegenüber Nadelhölzern deutlich schwerer und auch teurer. Trotzdem nutzte die Hochschule für Bau, Architektur und Holz (BFH-AHB) Biel das Holz für eine Fassade mit vorgehängten Elementen, wobei die Anordnung der Bretter zwischen den Fenstern vertikal und unter den Fenstern horizontal ist. Die Konstruktion der Fassade lässt keine Bildung von Stauässe zu. Realisiert wurde dies z.B. über geneigte Tropfbretter an der Ober- und Unterseite der vertikalen Elemente sowie durch steildachförmig gehobelte Balkongeländer. Eine statische Funktion besitzt die Fassade allerdings nicht. Das übernehmen dahinterliegende 7 cm starke Kerto-Platten.



Abb. 3-8: Anordnung der Fassade aus Eichenbrettern der BFH-AHB (Thomas Volkmer)



Abb. 3-9: Detailansicht der Eichenbretter der Fassade der BFH-AHB (Thomas Volkmer)

„Woodstock“ stellte ebenso eine vielversprechende Lösung vor. Die Gebäudehülle setzt sich aus drei unterschiedlichen Fassadensystemen zusammen, mit denen die Anforderungen an den Energieverbrauch realisierbar sind. Eine der Varianten ist die Kombination von schmalen Buchensperrholzplatten mit Photovoltaikzellen, die im Querschnitt dreieckförmig auf einer Unterkonstruktion angebracht sind. Die Anordnung ist intelligent gelöst, da die Photovoltaikzellen zur Sonne ausgerichtet und die darunterliegenden Buchenelemente nur geringfügig der Witterung ausgesetzt sind. Es handelt sich zwar hier nicht um Vollholz, das Beispiel soll jedoch verdeutlichen, dass Fassadensysteme aus Buche prinzipiell möglich sind.

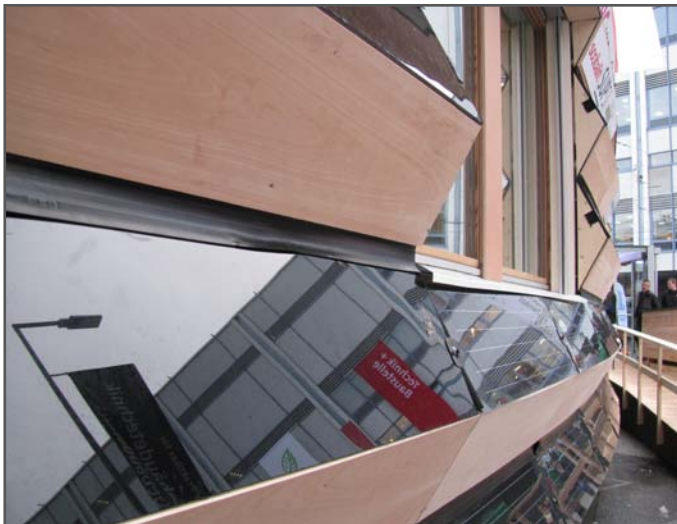


Abb. 3-10: Ansicht der Woodstockfassade mit Buchensperrholz und Photovoltaikzellen (Verena Krackler)

Eisenbahnschwellen

Die Erfindung der Eisenbahn war die Geburtsstunde der Holzschwelle. Mitte des 19. Jhd. wurden die ersten Linien in der Schweiz verlegt. Der Bedarf war zur damaligen Zeit enorm hoch, so dass die Schwelle anfangs als Feind des Eichenholzes gesehen wurde. Grund für die Besorgnis war der schlechte Waldzustand aufgrund jahrzehntelanger Rodungen. Viele Schweizer Forstwissenschaftler warnten daher die Bevölkerung vor möglichen Folgen wie Überschwemmungen und berechneten die letzte Fällung von Bäumen bei Übernutzung. Forstexperten sahen den Wald in dreierlei Hinsicht bedroht, zum einen durch Rodungen für den Streckenverlauf, Bauholz für den Geleisoberbau und Gebäude sowie durch Brennholz für Lokomotiven. Vor allem die Anzahl an eingesetzten Schwellen war ausserordentlich hoch. Pro Kilometer wurden 1700 Stück benötigt, bis 1914 hatte die Strecke eine Länge von 5032 km. Anfangs wurden für die Schwellen (Volumen: 0,095 m³) auch Nadelhölzer wie Tanne, Lärche und Arve eingesetzt. Buche bereitete vorerst aufgrund seiner geringen Dauerhaftigkeit Probleme. Eine Imprägnierung war nötig, brachte jedoch zu Beginn nicht das gewünschte Ergebnis. Mit der Entwicklung der Teerölimprägnierung wurde dieses Problem zu Beginn des 20. Jhd. schliesslich gelöst. Das beste Schwellenholz war allerdings die Eiche, da sie auch ohne Schutzbehandlung eine längere Lebensdauer als die restlichen Hölzer aufwies. Die Befürchtungen der Fachleute schienen sich um 1880 zu bewahrheiten – Eichenwälder gingen noch mehr zurück, die Holzpreise stiegen und die Anzahl gebrauchter Schwellen nahm ein ungeahntes Ausmass an. Zur unverhofften Lösung des Problems kam es durch die Entwicklung von Eisenschwellen. Grosse Teile der Holzschwellen wurden bis 1914 ersetzt. Bis 1945 bestand das Netz ca. zu 2/3 aus Eisen- und zu 1/3 aus Holzschwellen.

Weitere Veränderungen brachten Betonschwellen, die sich durch eine bessere Lagestabilität und eine lange Lebensdauer auszeichnen.

In der Schweiz werden Buche und Eiche verwendet, in Ländern ohne Laubholzaufkommen auch Kiefer. Von der Buche können die spannungsreichen, schwierig zu bearbeitenden mittleren Stammabschnitte verwendet werden. Heute werden Holzschwellen nur noch mässig eingesetzt, sind jedoch in einigen Bereichen des Gleisbaus unersetzlich. Dazu gehören vor allem Weichen, Rangieranlagen und Brücken. Man sieht sie aber auch noch in Bahnhöfen oder Tunneln. Besonders an Weichen werden bis zu 5 m lange Schwellen benötigt, die nicht mit Beton oder Stahl, sondern nur mit Holz realisiert werden können. In der Schweiz wird hierfür lediglich Eiche verwendet, da sie in solchen Dimensionen Holz entsprechender Qualität bereitstellt. Holzschwellen zeichnen sich durch folgende Vor- und Nachteile aus (Tabelle 3-2):

Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der Holzschwelle

Holzschwellen	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - hohe Anpassungsfähigkeit - geeignet für hohe Lasten - Verwendung bei verschiedensten Böden - kein Bruch bei Entgleisung, Gleisanlage bleibt bei Entgleisung befahrbar, problemlos austauschbar - Verhinderung von Resonanzen bei Brücken - einheimischer, nachwachsender Rohstoff - Energierückgewinnung durch Verbrennung 	<ul style="list-style-type: none"> - kürzere Liegedauer (24 Jahre) als Stahl- (30 Jahre) und Betonschwellen (35 Jahre) - notwendige Imprägnierung - Emission von Teerölbestandteilen während der Nutzung - aufwendige Schienenbefestigung - Entsorgung als Sondermüll

Nach Angaben von Corbat (2010) liegt die Schwellenausbeute in Abhängigkeit vom Rundholz für Buche bei ca. 38 % und bei Eiche sogar nur bei ca. 30 bis 35 %. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit ist eine Druckimprägnierung unerlässlich, die mit wasserunlöslichem Kupfer-Chrom-Arsen, hauptsächlich aber mit teeröhlhaltigen Schutzmitteln wie Carbolineum oder Kreosot erfolgt. In der Schweiz werden die Eichenschwellen aufgrund ihrer besseren Dauerhaftigkeit nur einmal, die Buchenschwellen zweimal imprägniert. Teeröle sind haureizend, enthalten vermutlich krebsfördernde Verbindungen und belasten Boden und Gewässer. Daher ist es seit 2002 in der Schweiz verboten, ausgediente carbolineumhaltige Schwellen im Gartenbau oder für Spielplätze einzusetzen.

Trotz einiger negativer Eigenschaften ist die Holzschwelle ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor für die schweizerische Holzindustrie. Marktführer in der Schweiz ist die Corbat-Holding SA mit einem Produktionsvolumen von ca. 100.000 Schwellen pro Jahr, was 7.000 bis 10.000 m³ entspricht. Hauptabnehmer ist Schweizerische Bundesbahn (SBB), aber auch private Bahnunternehmen haben Bedarf. Die SBB plant nach Corbat (2010), die benötigten Schwellen für 2010 aus dem Nachbarland Frankreich zu beziehen, mit der Begründung, dass ab einer bestimmten Auftragssumme Ausschreibungen international erfolgen müssen. Letztendlich geht es natürlich um Einsparungen. Auch aus anderen Ländern wurden schon Importe getätigt. Die Entscheidung zugunsten Frankreichs oder der Schweiz steht noch aus. Für die hiesigen Sägewerke würde dies erhebliche Folgen haben. Bezogen auf die jährliche Laubholzernte beträgt der Schwellenanteil immerhin 10 %. Für Firmen wie die Corbat-Holding SA geht es um die Existenzgrundlage. Zudem besteht hier eine ideale Verwertungsmöglichkeit für die qualitativ minderwertigeren Sortimente, welche im Möbel- oder Innenausbau keine Verwendung finden. Auch das Image der SBB würde leiden, wenn

publik wird, dass Schwellen über grosse Distanzen importiert werden, obwohl der heimische Wald ausreichend Rohstoffe bereithält.

Lärmschutzwände

Der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur zieht auch den Bau von Lärmschutzwänden nach sich. Diese können aus den unterschiedlichsten Materialien und somit auch aus Holz gefertigt sein. Die entsprechenden Anforderungen sind in den „Zusätzlich technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Ausführung von Lärmschutzwänden an Strassen“ (ZTW-Lsw) geregelt, welche 2006 aufgrund der vorangeschrittenen europäischen Normung überarbeitet wurden. Bezüglich der Gebrauchstauglichkeit müssen die Wandelemente folgende Bedingungen erfüllen:

- ◆ Erfüllung der schalltechnischen Anforderungen
- ◆ Berücksichtigung der Forderungen der Verkehrssicherheit
- ◆ Formbeständigkeit und Standsicherheit
- ◆ Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit, evtl. mit entsprechendem Schutz
- ◆ Masshaltigkeit
- ◆ Farbtonbeständigkeit
- ◆ Feuer- und Steinwurfresistenz
- ◆ Wartungsfreundlichkeit

Grundsätzlich sind nach der ZTW-Lsw alle Holzarten erlaubt, sofern sie im Falle einer nicht ausreichenden natürlichen Dauerhaftigkeit mit einem Holzschutzmittel nach DIN 68 800 Teil 3 (2009) behandelt wurden. Konstruktiv kann das Holz geschützt werden, indem durch geeignete Ständerelemente ein Erdkontakt vermieden wird. Dies erhöht in jedem Fall die Nutzungsdauer. Unter Beachtung dieser Konstruktionsregel werden Lärmschutzwände der Gebrauchsklasse 3 zugeordnet, welche Bauteile beinhaltet, die der Witterung, aber keinem Erdkontakt ausgesetzt sind. Hölzer müssen die Dauerhaftigkeitsklasse 1 oder 2 aufweisen, um in der Gebrauchsklasse 3 ohne Schutzbehandlung verbaut werden zu können. Dazu gehören in Mitteleuropa Eiche und Robinie. Esche und Buche sind nicht dauerhaft (Dauerhaftigkeitsklasse 5) und bedürfen auf jeden Fall einer entsprechenden Imprägnierung oder auch Modifizierung. Laut der überarbeiteten ZTW-Lsw 06 eignet sich thermisch modifiziertes Eschen- oder Buchenholz bezüglich der Dauerhaftigkeit für den Einsatz in Lärmschutzwänden. Etwas anders sieht es noch bei der Gewährleistung der Standsicherheit aus. Holzarten, die nach zugelassenen Holzbaunormen nicht mit Rechenwerten ausgestattet sind, gelten für tragende Bauteile als nicht zugelassene Baustoffe. Nachgewiesen wird die Standsicherheit nach ZTW-Lsw 06 mittels Tragfähigkeitsversuchs nach EN 1793-2 mit der maximal durchlässigen Biegung. Für thermisch modifiziertes Holz fehlen im Gegensatz zu unbehandelten Nadel- und Laubhölzern Belastungswerte, die gegenwärtig noch ermittelt werden.

Schon in den 1990er Jahren wurden in der Schweiz Lärmschutzwände aus druckimprägniertem, minderwertigem Buchenschnittholz hergestellt. Bereits damals war man bemüht, Verwendungsmöglichkeiten für qualitativ schlechtere Sortimente zu finden. Je nach Anforderung war die Ausführung einfach oder zweiseitig, z. T. wurden die Wände bepflanzte. Für eine einfache Wand wurden pro Kilometer ca. 150 m³ Holz eingesetzt (Hurst et al. 1989).

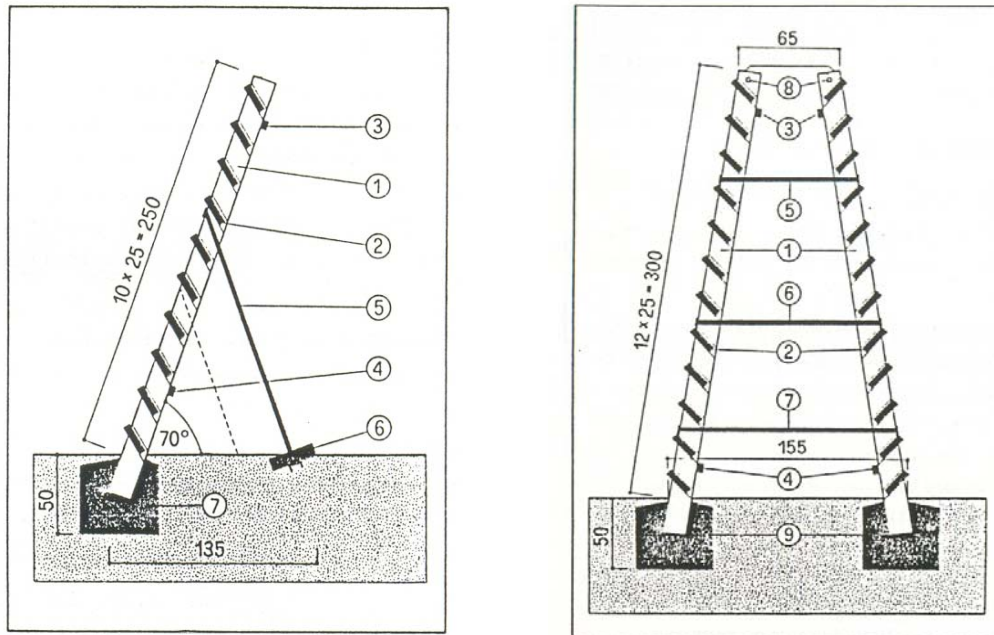


Abb. 3-11: Konstruktion der Lärmschutzwände, links: einfach, rechts: zweiseitig (Hurst et al. 1989)

3.1.2 Gartenbau

Produkte aus einheimischen Laubholzarten sind im Gartenbereich derzeit noch rar, einzig einige Möbel werden angeboten. Marktführer ist momentan Teak, ein über weite Distanzen importiertes Tropenholz. Gerade für Wintergärten oder überdachte Terrassen würde sich die heimische Buche ideal eignen. Mit ihrem Rotkern könnten gezielt individuelle Produkte geschaffen werden. Kleine Schutzüberzüge aus Kunststoff wären eine Möglichkeit, die Möbel im Bodenbereich vor evtl. aufsteigender Nässe zu schützen. Alternativen wären die thermische Modifizierung oder ähnliche Verfahren. Auch für den Gartenhausbau ist die Verwendung von Laubhölzern (Fassade aus Eiche oder Thermobuche, Innenverkleidung aus Buche) nicht ausgeschlossen. Für Terrassenbeläge eignet sich nur die Eiche, die allerdings derzeit kaum eingesetzt wird, da auch hier die Tropenhölzer dominieren oder alternative Materialien wie WPC angeboten werden. Bei Terrassen aus thermisch modifiziertem Holz ist allerdings Vorsicht geboten: Thermoholz erhält zwar einen hydrophoben Charakter, kann aber trotzdem weiterhin Wasser in den Zellhohlräumen aufnehmen und dadurch auch von holzerstörenden Pilzen besiedelt werden. Thermo-Buche erwies sich zwar in Laboruntersuchungen als sehr dauerhaft bis dauerhaft, allerdings fehlen noch immer Erkenntnisse aus Freilandprüfungen, da diese als Langzeitversuche auf mehrere Jahre angelegt sind.

Der Gartenbau bietet reichlich Potential für Laubholz, zumal die Bevölkerung ihren persönlichen Aussenbereich zunehmend als Wohnraum betrachtet und Wert auf eine hochwertige Ausstattung legt. Gerade Gartenmöbel werden denjenigen aus dem Wohnbereich immer ähnlicher. Ästhetische Aspekte sind genauso wichtig wie Behaglichkeit und Ergonomie.

3.1.3 Innenausbau

Parkett

Parkett ist eins der wenigen Einsatzgebiete, in denen Laubhölzer, vor allem die hoher Dichte, vorherrschen. Es strahlt Behaglichkeit und Wärme aus. Zudem ist es pflegeleicht, hygienisch, schleif- und wieder versiegelbar. Die Maserung des Holzes macht jede Fläche zum Unikat. Die Herstellung erfolgt aus Rohfriesen: „scharfkantige, parallel besäumte, an den Enden gekappte und auf gleiche Dicke geschnittene Hölzer“ (Lohmann 2003), welche anschliessend zu den verschiedenen Parkettarten verarbeitet werden können. Dazu gehören:

- ◆ Parkettstäbe mit Nut und/oder Feder aus Massivholz von mehr als 14 mm Dicke
- ◆ Parkettstäbe ohne Verbindungsprofil mit einer Dicke von 9-14 mm
- ◆ Parkettstäbe mit einem definierten Verbindungsprofil aus Massivholz mit einer Dicke von 8-14 mm (Overlay-Parkettstab) bzw. mehr als 13 mm (Parkettblock)
- ◆ Mosaikparkett mit einer Dicke von 7-8 mm
- ◆ Mehrschichtparkett mit einer Nutzschicht aus Vollholz und einem Holzwerkstoffträger
- ◆ Laubholz-Fussbodendielen mit Nut-/Federverbindung und einer Gesamtdicke von mehr als 14 mm
- ◆ Nadelholz-Fussbodendielen mit Nut-/Federverbindung

Sortierregeln sowie Anforderungen an die geometrischen Eigenschaften werden in der DIN EN 13226 (DIN_EN_13226 2009) festgelegt. Mehrschichtparkett dominiert in der Schweiz nach wie vor (80 %), Massivparkett (Parkettstäbe) und Mosaikparkett machen lediglich einen Fünftel des Absatzes aus (Anonymus 2009a). Im Jahre 2008 wurden in der Schweiz 5,4 Mio. m² verlegt, was ein Plus von 3,5 % zum Vorjahr bedeutete und damit sogar der Laminatverbrauch überholt wurde. Die Wirtschaftskrise machte allerdings auch vor dieser Branche nicht Halt. Ende 2009 lag der Bedarf ca. 10 % unter der Vergleichsperiode von 2008 (Anonymus 2009a). Neben einem rückläufigen Wohneigentumsmarkt sind es vor allem Billiganbieter aus dem meist osteuropäischen oder asiatischen Raum, mit denen die schweizerische Parkettindustrie zu kämpfen hat. Länder wie Ungarn, Tschechien und Rumänien verzeichneten 2008 Absatzsteigerungen, während der Verbrauch in Westeuropa zum Teil drastisch sank. Trotz der Negativzahlen weist die Schweiz im Durchschnitt den dritthöchsten Pro-Kopf-Verbrauch nach Österreich und Schweden auf.

Beliebteste Holzart ist in Europa die Eiche. Platz 2 nehmen leider immer noch Tropenhölzer ein, obwohl der Import rückläufig ist. Buche büsste in den letzten Jahren am stärksten an Popularität ein; sie liegt saisonweise sogar hinter der Esche. Weitere europäische Laubhölzer wie Kirsch- oder Nussbaum werden zwar nur in Kleinstmengen verarbeitet, liegen jedoch als dunkle Hölzer derzeit im Trend (Lysser 2009). Das erklärt auch die Beliebtheit der Eiche und den Absturz der Buche. Parkett, welches den Schein eines jahrzehntelangen Gebrauchs aufweist, liegt derzeit voll im Trend. Hersteller nutzen diese Entwicklung und statten es bereits im Werk mit Vertiefungen, Wurmlöchern oder Abnutzungerscheinungen aus. Damit lässt man den Werkstoff Holz bewusst altern, ohne dass es an Wert verliert. Für seine Produktlinie „Parkett pur“ (Abb. 3-12) verarbeitet das Unternehmen Bauwerk Parkett AG ausschliesslich Holz aus Schweizer Wäldern. Auf diese Weise versuchen sie, die Kundschaft für die Herkunft des Holzes zu sensibilisieren, um Transportwege zu verkürzen und die heimische Wirtschaft zu fördern.



Abb. 3-12: Werbung von Bauwerk für Schweizer Holz (Verena Krackler)

Fenster/Türen

Holz gehört noch immer zu den wichtigsten Materialien für den Fenster- und Türenbau. Allerdings muss hier vor allem bei den Türen zwischen Elementen unterschieden werden, die vollständig im Innenbereich liegen oder mit einer Seite der Bewitterung und Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Innentüren aus Vollholz sind nur noch sehr selten; sie bestehen überwiegend aus Röhrenspanplatten oder Wabenkarton, die überfurniert oder mit Dekorfolie überzogen werden. Ausnahmen sind denkmalgeschützte Häuser oder Sonderanfertigungen. Im Fenster- und Haustürenbau dagegen werden aufgrund besonderer Anforderungen Vollhölzer als Rahmenmaterial eingesetzt. Für die Herstellung von Fenstern und Türen eignen sich sowohl Nadel- als auch Laubhölzer. Im Gegensatz zu den Nadelhölzern werden jedoch bei den Laubhölzern ausser der Eiche viele aussereuropäische Arten wie Mahagoni, Meranti, Sipo oder Eukalyptus verwendet, die besonders den Vorteil einer hohen Dauerhaftigkeit bieten. Besonders die Anforderungen an Fenster und Türen, die einer direkten Bewitterung ausgesetzt sind, sind hoch, wobei dieser Aspekt bei Fenstern noch bedeutender ist. Haustüren sind oft durch Vordächer oder Eingangsportale geschützt. Mitteleuropäische Holzarten können diese Bedingungen nur schwer erfüllen. Buche, Ahorn, Esche, gleichzeitig neben der Eiche die wichtigsten schweizerischen Laubholzarten, sind zum einen nicht dauerhaft und neigen zum anderen durch die hohe Dichte zu einem ausgeprägten Quell- und Schwindverhalten und damit zu Formänderungen. Eine Möglichkeit, sie dennoch einzusetzen, bieten Verbundkonstruktionen, bei denen das Holz durch eine Vorsatzschale z.B. aus Metall (meist Holz-Alu-Fenster) oder Kunststoff geschützt wird. Das Fenster ist damit einer geringeren Belastung durch Niederschlag oder Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Allerdings sind Schutzmassnahmen im Innenbereich trotzdem nicht ausser Acht zu lassen. Die Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau führte dazu Untersuchungen durch. Getestet wurden Fensterflügel aus Buche, Esche Ahorn und Fichte ohne und mit Vorsatzschalen aus Aluminium und Fibrex (Komposit aus 60 % Kunststoff und 40 % Holzfasern) auf das Verformungsverhalten infolge von Klimabelastungen sowie auf die Gefahr von Feuchteanreicherungen zwischen Holz und Beplankung bei diffusionsbehinderten Konstruktionen. Die Prüftemperaturen betragen auf der Innenraumseite 23 °C und auf der Aussenseite -10 °C für eine Dauer von 24 Stunden und 49 Tagen. Folgende Beobachtungen wurden dokumentiert (Tabelle 3-3):

Tab. 3-3: Versuchsergebnisse der Prüfung von Fenstern aus Buche, Esche und Ahorn ohne und mit Vorsatzschalen (Berner Fachhochschule 2007)

Prüfungsdauer	
24 Stunden	49 Tage
<u>ohne Vorsatzschale</u> - keine Einschränkung der Funktion, aber - Bildung von Kondenswasser auf dem Flügelprofil → Aufsaugen und Aufweichen des Holzes	- Unterschiede zwischen Aluminium und Fibrex gering - bei beiden Vorsatzschalentypen kam es zur Schimmelpilzbildung
<u>mit Vorsatzschale</u> - Fibrex: Verminderung der Kondenswasserbildung durch leichte Erhöhung der Oberflächentemperaturen auf der Aussenseite - Aluminium: Bildung von mehr Kondenswasser durch leicht tiefere Temperaturen auf der Raumseite; schnellere Reaktion auf Temperaturänderungen	- Buche: kein Abfließen, sondern Aufsaugen des Kondenswassers → Erhöhung der Holzfeuchte → starkes Quellen und Verzug der Frieße im unteren Bereich - Fichte, Ahorn, Esche: Abfließen des Kondenswassers erst nach verstärkter Ansammlung von Kondenswasser; Fichte im allgemeinen weniger geschädigt

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Laubhölzer im Innenbereich vor Kondenswasser zu schützen sind. Eine Ansammlung oder Aufsaugung führt zu Schimmelpilzbildungen und Verformungen. Geschlossene Fugen bei den Rahmeneckverbindungen sind unbedingt einzuhalten. Es gilt vor allem, den Flügelries vor Feuchte zu schützen. Die Autoren raten zu einer Oberflächenbehandlung, zu einem Gefälle an der inneren Glaswange und zur Erhöhung der Oberflächentemperatur im Randbereich der inneren Scheibe (z.B. Glaselemente mit höherem Wärmedurchlasswiderstand). Auch die Modifizierung der Hölzer wird nicht ausgeschlossen. Die Möglichkeiten dazu sind vielfältig. Neben einer thermischen Behandlung ist eine Acetylierung oder Kebonisierung möglich. Eine entsprechende Übersicht gibt Abschnitt 3.3.

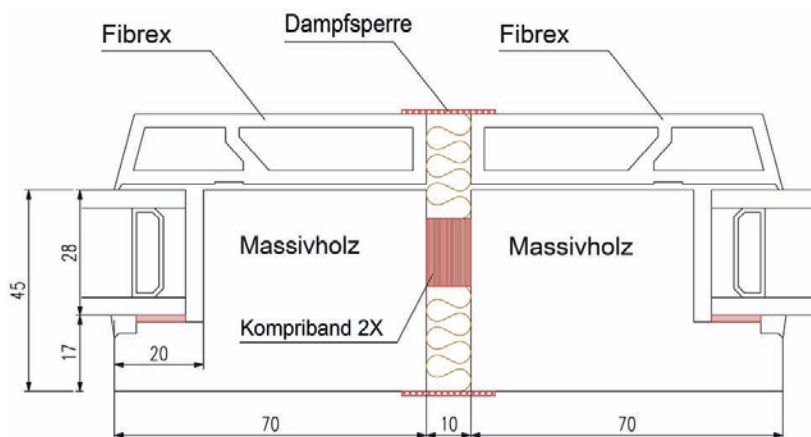


Abb. 3-13: Querschnitt eines geprüften Fensters mit Fibrex-Vorsatzschale (Berner Fachhochschule 2007)

3.1.4 Möbelbau

Möbel sind ein fundamentaler Bestandteil unseres Lebens und der Lebensqualität. Sie vereinen Sicherheit, Funktionalität und Ästhetik, die je nach Verwendungszweck unterschiedlich stark ausgeprägt sein können, allerdings immer eine Einheit bilden sollten. Entscheidend geprägt wird das Erscheinungsbild von der Struktur sowie der Änderung eines

Volkes oder Landes, ersichtlich an den Einflüssen der einzelnen geschichtlichen Epochen. In Abhängigkeit vom Gesellschaftsstand standen konstruktive und gestalterische Aspekte unterschiedlich stark im Vordergrund, doch verzierten auch schon Bauernfamilien ihr Mobiliar mit Schnitzereien.

Die Einteilung der Möbel kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Eine übliche Methode ist die Angabe der:

- ◆ Art (Ergänzungs-, Garnitur- und Kleinmöbel)
- ◆ Verwendungszweck (Wohnmöbel, Möbel für öffentliche Bereiche)
- ◆ Funktion/ Konstruktionsart (Platten-, Rahmen-, Stollen-, Gestell-, Wangenbauweise)

In Folge der Wirtschaftskrise verzeichnete die Schweizer Möbelbranche 2009 erhebliche Umsatzeinbrüche. Dazu trug vor allem auch der Rückgang des Baus neuer Wohnungen um ca. 10 % im Vergleich zu 2008 bei. Der zweiten Jahreshälfte 2010 wird ein langsam wachsender Aufschwung vorausgesagt, was sich positiv auf die Möbelbranche auswirken würde (Büren 2009) Unter den 11 grössten Möbelhändlern verzeichnet Ikea derzeit mit Abstand den stärksten Umsatz. Aber auch die restlichen zehn (u.a. Migros, Pfister, Märki) tragen dazu bei, dass ca. 81 % des Gesamtmarktes durch diese Grosshändler gedeckt werden. Sie zeichnet vor allem ein professionelles Marketing mit von Fachleuten gestalteten Katalogen, Prospekten und Plakaten aus, die regelmässig erscheinen und der Bevölkerung eine Trendrichtung vermitteln. Kleineren Betrieben fällt es mitunter schwer mitzuhalten, da ihnen allein die finanziellen Mittel für derartiges Marketing fehlen. Hilfreich könnten beispielsweise vom Bund finanzierte Werbekampagnen sein („Individuelle und umweltbewusste Lebensweise gefragt? - Möbel aus Schweizer (Laub-) Holz bei ihrem Schreiner um die Ecke“ o.ä.). Das Vollholzmöbel ist einem zunehmenden Konkurrenzdruck durch günstigere und schnell hergestellte Holzwerkstoffen ausgesetzt. Die Kunden sind jedoch im Moment durch Klimadebatten und Nachhaltigkeitsdiskussionen sensibilisiert für Umweltthemen. Eine entsprechende Öffentlichkeitsarbeit und ein einprägsames Label für Schweizer Laubholz wären mögliche Optionen. Dabei könnte auch die rotkernige Buche als Holzart für individuelle Möbel vermarktet werden. Trendholzart nach der Deutschen Möbelindustrie ist im Jahr 2010 Nussbaum, allerdings verlieren auch Eiche, Buche, Esche, Erle, Birke und Ahorn nicht ihren Wert.

Nur wenige reine Massivmöbel existieren. Viele Elemente wie Tischplatten, Schrankelemente oder Regale werden meist verleimt und sind daher schon den Vollholzwerkstoffen zuzuordnen. Beides ist eng miteinander verknüpft. Erst die Verleimung gewährleistet ein funktionales und langlebiges Produkt, so dass auf eine Aufzählung nicht verzichtet werden soll. Dazu gehören:

- ◆ Stühle, Tische, Hocker, Polstermöbelgestelle,
- ◆ Betten, Schränke, Truhen, Regale, Sideboards, Garderoben, -ständler,...
- ◆ Küchenmöbel
- ◆ Badezimmermöbel, Medizinschränke
- ◆ Kindermöbel
- ◆ Möbel für öffentliche Bauten (Büro, Krankenhaus, Pflegeheime, Herbergen, Läden,...)



Abb. 3-14: Beispiele für Massivholzmöbel aus Laubholz. Links: Firma Benz, Kandern, Deutschland (www.schreinerei-benz.de). Rechts: Friedrich Kracke Sitzmöbel GmbH, Hülsede, Deutschland (www.kracke-sitzmoebel.de)

Auf den ersten Blick erscheinen Badewannen aus Holz zwar noch immer ungewöhnlich, erfreuen sich allerdings mittlerweile zunehmender Beliebtheit. An der Swissbau 2010 konnte das Modell Laguna Pearl von der Bagno Sasso AG (Hauptsitz: Landquart, Schweiz) aus Nussbaumfurnier begutachtet werden. Es handelt sich zwar hierbei um Furnier, verdeutlicht jedoch die Vielfältigkeit der Einsatzgebiete von Holz. Matteo Thun, ein italienischer Designer, hat mit dem Objekt Ofuro eine schlichte aber formschöne Badewanne aus Lärchenholz entworfen, welche an die japanische Badekultur erinnern soll. Er zeigt damit, dass dem Werkstoff Holz beinahe keine Grenzen gesetzt. Alte Einsatzbereiche können zurückerobert werden mit Formen und Konstruktionen, die den heutigen Bedürfnissen angepasst sind.



Abb. 3-15: Holzbadewanne Ofuro des Designers Matteo Thun (www.matteothun.com)

Bei dem nächsten Beispiel handelt es sich im Grunde um kein Möbelstück mehr, sondern eher um ein raumfüllendes Inventar. Saunakabinen dienen der Entspannung und bestehen vorherrschend aus Holz. Der schwedische Sauna- und Dampfbadhersteller Tylö, vertreten in der Schweiz durch die Sauna-Bau AG (Herzogenbuchsee), verwendet für einige seiner Modelle Buchenholz. Dabei reicht die Anwendung von einzelnen Detailausführungen bis hin zur Aussen- und Innenverkleidung.



Abb. 3-16: Saunakabine aus Buchenholz der Firma Tylö (www.tylo.com)

3.1.5 Sargbau

In der Bevölkerung oftmals ein Tabuthema, handelt es sich hierbei jedoch um ein Verwendungsgebiet, in dem Holz eine Vorreiterstellung besitzt und zudem permanent gebraucht wird. Nach der Todesfallstatistik der Schweiz liegen die Sterberaten seit 2002 jährlich bei durchschnittlich 61.250 Personen. Die üblichsten Bestattungsarten sind immer noch die Erd- und die Urnenbestattung. Bei beiden wird ein Sarg benötigt. Nach der VDI-Richtlinie 3891 „Emissionsminderung Einäscherungsanlagen“ sollten für eine Feuerbestattung möglichst Vollhölzer zum Einsatz kommen. Andere Materialien müssen einen Gleichwertigkeitsnachweis erbringen, insbesondere die Emission von Schadstoffen sollte nicht höher sein. Auch der Erdsarg muss bestimmte Anforderungen erfüllen. Material und Stärke müssen so beschaffen sein, dass er innerhalb von ca. 20 Jahren vollständig verrottet. Aufgrund der Bestimmungen ist für beide Bestattungsarten Holz immer noch das ideale Material. Übliche Holzarten sind Kiefer, Pappel und Eiche. Mitunter verarbeiten Hersteller auch Buche, so gesehen u.a. bei der Andres & Massmann GmbH & Co. KG (Blankenrath, Deutschland), deren Modelle schlicht, aber elegant wirken:



Abb. 3-17: Buchensärge (www.andres-massmann.de)

Die inländischen Sargproduzenten leiden unter Importen aus dem Ausland. Gerade die rotkernige Buche würde sich jedoch für Einäscherungsärge eignen. Realisierbar wären aber auch dekorative Erdbestattungsärge, bei denen der Rotkern bewusst eingesetzt wird.

Das Thema Tod wird in Mitteleuropa oft noch mit Zurückhaltung behandelt. Nicht Betroffene verhalten sich distanziert, respektvoll und mitunter scheu. Betroffene wiederum tragen ihre Gefühle selten nach aussen, das eigene Verhalten und die Erwartungen (z.B. Todesanzeigen) werden meist den gesellschaftlichen Normen angepasst. Von etwas mehr Offenheit gegenüber dem Thema und dem Mut, dem Verstorbenen ein Teil seines Lebens mitzugeben, würde auch der Vielfältigkeit an Sargmodellen profitieren. Dass dies funktionieren kann, beweist die englische Firma Grazy Coffins, die neben traditionellen Modellen auch Särgen mit unterschiedlichsten Formen des Alltags wie Gitarren, Skateboards oder Containern anbietet. Engländer scheinen in dieser Beziehung hemmungsloser, humorvoller und freimütiger. Ganz klar trifft dies jedoch nicht jedermanns Geschmack, der Umgang mit diesem Thema ist daher jedem selbst überlassen. Dieser Abschnitt soll also lediglich weitere Möglichkeiten des Laubholzeinsatzes aufzeigen. Naturbestattungen und die Verpressung menschlicher Asche zu einem Diamanten zeigen zudem, dass die Schweizer ungewöhnlichen Beerdigungen eher aufgeschlossen gegenüber stehen.



Abb. 3-18: Ungewöhnliche Sargmodelle der Firma Grazy Coffins (www.crazycoffins.co.uk)

3.1.6 Mykoholz

Insbesondere Hartlaubhölzer wie Eiche und Buche werden zur Zucht von essbaren Pilzen genutzt. Luthardt (1969) beschreibt in seinem Werk „Holzbewohnende Pilze“ die Anzucht solcher Speisepilze, mit denen in der Nachkriegszeit eine zusätzliche Nahrungsquelle geschaffen wurde. Die von ihm verwendeten Pilze verursachen im Holz eine Weissfäule, bei der als erstes das Lignin abgebaut wird. Dadurch wird das Holz aufgehellt, verliert an Rohdichte und wirkt schwammig, zerfällt jedoch nicht wie bei der Braunfäule. Luthardt fragte sich, inwieweit dieses modifizierte Holz weiter genutzt werden könnte. Es erwies sich als geeignet für die Uhrenindustrie (als Polierholz), womit die Geburtsstunde der industriellen Verwendung von Mykoholz eingeleitet wurde. Durch einen Mangel an alltäglichen Rohstoffen nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelten sich bald weitere Verwertungsmöglichkeiten. So schuf Luthardt aus in Paraffin getauchten Mykoholzstäbchen Kerzen. Für die industrielle Verwertung wurde berindetes Rundholz hauptsächlich aus Buche und Birke, seltener auch aus Rosskastanie und Aspe eingesetzt. Die Beimpfung erfolgte mit

einer speziell entwickelten Impfpaste aus mit dem Mycel des Kulturpilzes durchwachsenen Myko-Holzspänen und Pilznährstoffen. Je nach Verwendungszweck wurde das Holz innerhalb von drei bis fünf Monaten um 25 bis 90 % abgebaut. Als Bebrütungsart dienten Erdgruben oder später mit steigender Nachfrage unterirdische Gewölbe aus der Kriegszeit, in denen ein für das Pilzwachstum notwendiges gleichmässiges Klima herrschte. Das aufgelockerte Holz wies nach Tab. 3-4 folgende Eigenschaften im unvergüteten Zustand auf (durch Vergütung konnte das Profil je nach Verwendungszweck eingestellt werden):

Tab. 3-4: Eigenschaften von unvergütetem und vergütetem Mykoholz (Luthardt 1969)

Unvergütetes Myko-Holz	Vergütetes Myko-Holz
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe und gleichmässige Porosität • Geringe Rohdichteschwankung • Spannungsfreiheit (geringer Verzug) • Gute Isolierfähigkeit • Geringes Quellvermögen • Wärme- und Kälte-dämmung • Hohe Flexibilität • Schalldämmung • Hohe Feuchtigkeitsaufnahme • Hohe Absorption • Gute Imprägnierfähigkeit • Neutrales Verhalten des Holzes 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Schnitz- und Spitzbarkeit • Schwimmfähigkeit bei Abdichtung der äusseren Haut • Nichtbrennbarkeit • Säurefestigkeit • Wasser- und feuchteabweisend • Erhöhung der Verschleissfestigkeit durch verschiedene Oberflächenvergütungen

Neben dem Gebrauch als Polierholz und für Kerzen fand Mykoholz zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten mit gleichen, oft auch besseren Qualitäten im Vergleich zu den ursprünglichen Rohstoffen:

- ◆ Zeichengeräte wie Massstab- und Zeichenlineale
- ◆ Bleistift Holz aufgrund seiner guten Schnitz- und Spitzbarkeit
- ◆ Holzformen für die Glasindustrie aufgrund der hohen Wasseraufnahmefähigkeit zur Verlängerung der Verweilzeit des geschmolzenen Glases in der Form, da ein langes Dampfpolsters bereit gestellt werden kann
- ◆ Verwendung im Modell- und Formenbau aufgrund einer leichten Bearbeitung, geringerer Quellung und Schwindung und dem Wegfall innerer Spannungen
- ◆ Verwendung als schwer entflammables Holz aufgrund guter Tränkung in feuerhemmenden Flüssigkeiten
- ◆ Reissbretter, die sich durch eine enorme Leichtigkeit und Schönheit auszeichneten
- ◆ Verwendung für Bühnenbilder

Luthardt zählt auch noch weitere Möglichkeiten auf, die jedoch zum damaligen Zeitpunkt noch nicht näher untersucht wurden. So z.B. die Verwendung von Mykoholz für Musikinstrumente, um das Gewicht zu senken oder seiner Vermutung nach das Klangverhalten zu ändern. Dass er damit wohl Recht hatte, zeigte eine jüngst zum Teil aus Holz gefertigte Geige, deren Holz durch einen Weissfäuleerreger abgebaut wurde. Aus dem von der EMPA modifizierten Ahorn wurde der Geigenboden gefertigt. Das Resultat ist eine Geige mit Klangeigenschaften, die mit dem berühmten Modell von Antonio Stradivari vergleichbar sind. Der EMPA-Forscher Francis Schwarze wählte dafür den Pilz *Xylaria longipes*, der nur bestimmte Strukturen des Holzes angreift und damit die Dichte des Holzes, aber nicht die Biegefestigkeit und Schallgeschwindigkeit ändert (EMPA 2008).

Darüber hinaus ist derzeit in Europa keine weitere Nutzung des Mykoholzes bekannt. Mit dem Aufkommen neuer Materialien und der Erholung der Wirtschaft geriet auch das Mykoholz weitgehend in Vergessenheit. Für Massenfertigungen ist es aufgrund der langen Abbauphase aus wirtschaftlicher Sicht ungeeignet, allerdings bietet es interessante Einsatzmöglichkeiten für spezielle Anforderungen im kleinen Rahmen.

3.1.7 Weitere Verwendungsmöglichkeiten für Laubvollholz

Aus Laubvollholz lassen sich eine Menge weiterer, vor allem kleiner und kompakter Produkte herstellen. Über die Möglichkeiten weiterer Einsatzgebiete informiert die nachfolgende Tabelle.

Tab. 3-5: Weitere Verwendungsmöglichkeiten für Laubvollholz

Bereich	Beispiele	Holzarten	Normen	Bsp. Firmen
Paletten und Kisten	- Vierwege-Flachpaletten	- NH: Fichte, Kiefer, Tanne - LH: Buche, Eiche	- DIN 15146	- Ruedersäge AG (CH), Heinrich Lüffe-Baak GmbH & Co.KG (D)
	- Flachplatten	- NH: Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Lärche - LH: Pappel, Ahorn, Buche, Eiche, Esche, Kastanie, Platane, Robinie	- DIN 15147	
	- Transport-, Obst-, Gemüseboxen	- meist Nadelholz - Boden- und Randbretter auch aus Hartholz	/	
Sportgeräte	- Bowlingbahnen	- Fichte, Ahorn	- DIN 7901	- Hopps GmbH (D)
	- Barren	- Holme aus Esche, Buche, Schichtholz	- DIN 7906	- Stöhr Turn- und Sportgeräte GmbH (D), Spieth Gymnastic GmbH (D)
	- Schwebelbalken	- wahlweise Nadel- und Laubholz	- DIN 7908	
	- Sprungkästen	- Schwellen und Standelemente aus Hartholz	- DIN 7909	
	- Turnbänke	- Füße, Mittelstück und Einhängeleiste aus Hartholz	- DIN 7910	
	- Sprossenwände	- Holme aus Esche	- DIN 7911	
	- Gitterleitern	- Sprossen aus Esche	- DIN 7912	
	- Gymnastikkeulen	- aus Hartholz (meist Buche)	/	
Kleinwaren	- Werkzeuggriffe und -stiele	- Esche, Buche	/	
	- Holzdübel	- Buche, Eiche	DIN 68150	- Eicher Holzwaren AG (CH)
	- Lamello	- Buche	/	- Lamello AG (CH)
	- Rundstäbe	- Buche, Eiche, Esche, Ahorn	/	- Eicher Holzwaren AG (CH)
	- Handläufe	- u.a. Buche, Eiche, Esche, Ahorn	/	- Holz in Form Niedermeier GmbH (D)
	- Holzflicken	- sämtliche Holzarten	/	- Paul Bieli AG (CH), Lamello AG (CH)
	- Schneid-, Rüst- und Vesperbretter	- u.a. Buche, Ahorn, Esche	/	- Nef Holzwaren AG (CH)
	- Bilder-, Spiegelrahmen	- sämtliche Holzarten	/	- Nef Holzwaren AG (CH)
	- Kleiderbügel	- Buche, Ahorn, Esche, Linde	/	- Cortec GmbH (D)
Spielwaren	- Bausteine, Kleinkindspielzeug, Geduldsspiele	- meist Buche, Ahorn, Esche	RAL-UZ 130	- Christof Beck Spielwaren GmbH (D), Kiener Spielwaren (CH)
Schnitz- und Drechselwaren	- Dekowaren	- u.a. Esche, Linde	/	- Björn Köhler Kunsthandwerk (D), Drechslei Stich AG (CH)
Musikinstrumente und -zubehör	- Blockflöten	- u.a. Buche	/	- H.C. Fehr-Blockflötenbau AG (CH)
	- E-Gitarren	- Esche, Pappel, Erle, Ahorn	/	- Ibanez Guitars, Gibson Guitars
	- Trommeln, Drumsticks	- Buche, Eiche, Ahorn, Nussbaum	/	- Rohema Percussion OHG (D)

3.2 Holzwerkstoffe

Allgemein lassen sich Holzwerkstoffe als Materialien, die „durch Zerlegen des Holzes und anschliessendes Zusammenfügen der entstandenen Teile in geeigneter Weise, häufig (aber nicht ausschliesslich) mit Hilfe von Klebstoffen“ entstehen, charakterisieren (Wagenführ und Scholz 2008). Holzwerkstoffe werden je nach Aufschlussgrad und Aufbau in fünf Gruppen aufgeteilt – Vollholzwerkstoff, Furnierwerkstoff, Spanwerkstoff, Faserwerkstoff sowie Verbundwerkstoff.

Einschränkungen für die Produktion von Holzwerkstoffen aus Laubhölzern können mitunter je nach Land aus Richtlinien für Tätigkeiten oder Verfahren resultieren, bei denen Arbeitskräfte Holzstäuben, vor allem aus Hartholz, ausgesetzt sind. Da Laubholzstäube als Auslöser für allergische und toxische (bis hin zu kanzerogenen) Reaktionen der Atemwege und Schleimhäute gelten, darf die Holzbe- und verarbeitende Industrie in vielen Ländern maximale Holzstaubkonzentrationen der Luft nicht überschreiten. So betragen in Deutschland nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) die gesundheitsbasierten Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) und in Österreich nach der Grenzwerteverordnung (GKV) die Technischen Richtkonzentrationen (TRK-Werte) 2 mg/m^3 für Neuanlagen und 5 mg/m^3 für Maschinen, an denen nach dem Stand der Technik der Luftgrenzwert nicht eingehalten werden kann (Anonymus 2007, 2008a). Als besonders gefährlich werden aufgrund der nachgewiesenen Kanzerogenität Hartholzstäube eingestuft. Da Buche und Eiche die meist verwendeten Laubholzarten in Mitteleuropa sind, sind sie von dieser Regelung besonders betroffen. In Betrieben, in denen in erheblichem Umfang Buche bzw. Eiche be- und verarbeitet wird, herrschen daher besondere Vorschriften. Ein erheblicher Umfang liegt vor, wenn der Hartholzanteil mehr als 10 % des jährlichen Holzeinsatzes ausmacht. In diesem Fall gilt ein Umluftverbot, wodurch die Rückführung von Abluft, auch wenn sie gereinigt ist, verboten ist.

3.2.1 Vollholzwerkstoffe

Im Bereich der Vollholzwerkstoffe fanden und finden sehr viele Forschungsvorhaben und Bemühungen statt, um den Einsatz von Laubholz zu etablieren. Vor allem Brettschichtholz steht im Interesse der Wissenschaft. Der Baubereich, einer der Hauptabnehmer solcher Vollholzwerkstoffe, setzt im Moment 24 % Holz, überwiegend Nadelholz ein. Für ihn sind die Produkte besonders interessant, da dadurch Querschnitte und Dimensionen geschaffen werden können, die mit unverleimten Holzrohstoffen nicht realisierbar sind. Da hier vor allem meist grosse und massive Produkte verarbeitet werden, wäre es für den Absatz des Laubholzes besonders wichtig, feste Einsatzgebiete zu finden.

Die Einteilung der Werkstoffe auf Vollholzbasis erfolgt in plattenförmige und stabförmige Elemente sowie Verbundelemente. Unter die plattenförmigen Werkstoffe fallen ein- oder mehrschichtige Massivholzplatten, auch als Leimholzplatte bekannt. Das Brettschichtholz sowie lamelliertes Holz und Kreuzbalken sind den stabförmigen Elementen zuzuordnen. Verbundelemente bestehen meist aus zwei verschiedenen Werkstoffen. Dadurch ist es möglich, bessere Materialkennwerte in z.B. Wärme-oder Schalldämmung, als das einzelne Element besitzt, zu erzielen. Im tragenden Holzbau sind Vollholzwerkstoffe aus Laubhölzern im Moment noch Nischenprodukte, per Norm nicht zugelassen oder bedürfen aufgrund dessen einer bauaufsichtlichen Zulassung. Gerade hier wäre es jedoch wichtig Lösungen anzubieten, die zum einen eine Mehrnutzung ermöglichen und zum anderen den Holzbe- und verarbeitern die Herstellung durch einheitliche Richtlinien erleichtert würde.

1. Plattenförmige Vollholzwerkstoffe

Einschichtige Leimholzplatten: Einschichtige Leimholzplatten bestehen aus durchgehenden oder keilgezinkten Lamellen. Im Gegensatz zu vielen anderen Werkstoffen, ist hier die Verwendung von Laubhölzern keine Seltenheit mehr. Besonders beliebt ist die einschichtige Leimholzplatte aus Hartlaubhölzern wie Buche, Eiche, Birke, Erle, Kirsch- oder Nussbaum im Innenbereich für kleinere Flächen wie Tische, Küchenplatten, Treppenstufen und Möbelkörper. Buchenleimholzplatten sind zudem ein ideales Material für Arbeitsplatten im Handwerkerbereich oder für Werkbänke. Neben der nötigen Härte zeichnen sie sich Laubhölzer durch unterschiedliche Farbvarianten aus, mit denen besonders ästhetische und edle Produkte geschaffen werden können. Sogar oder speziell mit den sonst für minder gehaltenen Sortimenten der Kernbuche sowie Kernesche lassen sich kreative und einzigartige Produkte formen. Allerdings beschränkt sich deren Abnahme bis jetzt auf einen kleinen Käuferkreis. Das liegt zu einem daran, dass diese Produkte grösstenteils als Designarbeiten angeboten werden und damit der Preis für die breitere Masse zu hoch ist. Zum anderen spielt die Haltung des überwiegenden Teils der Bevölkerung gegenüber dem Holz eine Rolle. Die meisten setzen eine gleichmässige Oberflächenstruktur ohne Farbunterschiede und Holzfehler noch immer mit Qualität gleich, da dies für eine sorgfältige HolzAuswahl spricht. Das Gegenteil dessen beweisen mittlerweile einige Hersteller, die bewusst bestimmte Anomalien einsetzen. Zu nennen ist z.B. die Girsberger AG, ein Unternehmen mit weltweiten Standorten (u.a. in Bützberg, CH), die neben hochwertigen Stühlen und Bänken auch Tische aus dem Rot- bzw. Braunkern von Buche und Esche schaffen. Die Girsberger AG verarbeitet für die Produkte jährlich ca. 200 m³ rotkernige Buche und 150 m³ braunkernige Esche, wobei das dafür benötigte Holz nur von zertifizierten Betrieben stammt, die hauptsächlich in der Schweiz angesiedelt sind (Walther 2009).



Tisch MAX und Bank PERMESSO aus Kernbuche



Tisch BOX und Bank BOXBANCO aus Kernesche

Abb. 3-19: Produkte der Girsberger AG aus Kernbuche und -esche (Girsberger AG)

Mehrschichtige Massivholzplatten: Bei der klassischen Massivholzplatte werden sortierte und gehobelte Lamellen zu zwei zueinander parallel verlaufenden Decklagen und mindestens einer um 90° verdrehten Mittellage verleimt. Dadurch entsteht ein Absperrereffekt, wodurch das Quell- und Schwindverhalten des Holzes reduziert werden kann. Für tragende Zwecke muss die Decklagendicke mindesten 5 mm betragen. Die gebräuchlichste Holzart ist die Fichte, angeboten werden jedoch auch Varianten aus Laubhölzern wie Ahorn, Birke, Buche, Eiche und Esche, Kirsch- und Birnbaum.

Produkte: Als Firmenbeispiel kann hier die ALFA Massivholzplatten GmbH (Österreich) genannt werden, die ein- und mehrschichtige Massivholzplatten aus 14

verschiedenen Laubholzarten in unterschiedlichen Ausführungen für den Innenbereich auf dem Markt anbietet. Das Besondere des Unternehmens ist, dass das Muster jeder Platte per Hand zusammengestellt wird und somit die Oberfläche harmonisch wirkt und keine holprigen Übergänge entstehen. Eine Neuheit der Firma ist eine Dreischichtplatte in Leichtbauweise, die in Dicken bis 80 mm erhältlich ist. Erreicht wird dies durch die Nutzung des Systems „Dendro Light“ als Mittellage und die Beplankung mit 5 mm Deckschichten aus Laubholz. „Dendro Light“ ist eine Erfindung der DendroSolution GmbH (Österreich) und besteht aus einzelnen schräg zueinander gestellten Lamellen aus stehenden Jahresringen, die zudem wiederholt mit gegensätzlichen Nuten versehen wurden. Das garantiert hohe Festigkeiten bei geringem Quell- und Schwindverhalten und geringen Dichten. Vorteil der Platte ist das einfache und direkte Anbringen von Bekantungen, die Bearbeitung mit Maschinen des Holzhandwerkes und die Verwendung herkömmlicher Verbindungsmittel wie Dübel und Schrauben.

Forschung: Ungenutzte Potentiale für Massivholzplatten ergeben sich aus den meist minderwertigeren mittleren Stammabschnitten. Besonders die Buche ist davon betroffen, da wuchsbedingte Eigenspannungen ein Spalten des Stammes nach dem Fällen verursachen können und einen Einschnitt erschweren. Dieser Abschnitt wurde überwiegend für Eisenbahnschwellen verwendet, deren Zahlen jedoch aufgrund der erforderlichen Imprägnierung mit Teeröl und der damit einhergehenden schwierigen Entsorgung als Sondermüll, rückläufig sind. Schnider (2007) befasste sich mit diesem Problem und untersuchte u.a. die Eignung mittlerer Stammabschnitte aus Buche für Dreischichtplatten. Um den Eigenspannungen entgegenzuwirken, wurde ein Teil der Buche in zwei unterschiedlichen Graden thermisch behandelt. Für die Untersuchung wurden sowohl homogene aus drei Schichten unbehandelter und thermisch modifizierter Buche als auch inhomogene Plattenaufbauten gewählt. Diese bestanden aus Decklagen in Thermobuche und Mittelschichten aus unbehandeltem Holz. Geprüft wurden die Platten auf Plattenverzug, Eigenspannung, Delaminierung sowie freie und behinderte Quellung. Es zeigte sich, dass Platten aus oder mit Teilen aus thermisch behandelter Buche eine deutlich höhere Formstabilität und eine geringere Quellung aufweisen. Die Eigenspannungen waren bei einem homogenen Plattenaufbau aus thermisch behandelter Buche am geringsten, inhomogene Zusammensetzungen dagegen besaßen aufgrund des unterschiedlichen Quell- und Schwindverhaltens die stärksten Dehnungen. Schnider (2007) zeigte, dass thermisch behandelte Buche aus dem mittleren Stammabschnitt in Kombination mit unbehandelter Buche für Massivholzplatten geeignet ist. Allerdings sollten für eine noch bessere statische Tragfähigkeit und Formstabilität die Deckschichten der Platten aus unbehandelter Buche und der Kern aus Thermobuch bestehen. Wird dies beachtet, schlussfolgert der Autor, könnte eine solche Massivholzplatte für Wandelemente im äusseren Bereich des Wandaufbaus als Versteifung dienen. Wichtig dafür ist ein elastischer Klebstoff, der die entstehenden Eigenspannungen aufnimmt.

2. Stabförmige Vollholzwerkstoffe

Eine unter 84 schweizerischen, deutschen und österreichischen BSH-Herstellern durchgeführte Befragung im Jahre 2007 (Ohnesorge et al. 2009) ergab, dass im Jahre 2005 900.000 m³ stabförmigen Vollholzwerkstoffe produziert wurden davon 69 % BSH, 21 % Kreuz-, Duo- oder Triobalken und 10 % verklebte Decken- und Dachelemente. Gerade einmal 1 % des Produktionsvolumens, d.h. 90.000 m³, fiel jedoch lediglich auf Laubholzprodukte. 41 % der befragten Unternehmen gaben an laubholzerfahren zu sein. Meist verarbeitete Holzart war die Eiche, gefolgt von Buche und Esche. Als problematischer und hinderlicher gegenüber Nadelholzprodukten wurde die Verklebung genannt.

Brettschichtholz (BSH): Für Brettschichtholz werden visuell oder maschinell sortierte Bretter mit Keilzinken versehen und zu langen Lamellen verbunden. Nachdem diese Lamellen gehobelt wurden, werden sie beleimt, zum gewünschten Querschnitt aufeinandergeschichtet und unter Druck bis zur Erhärtung des Klebstoffs gepresst. Aufgrund der guten Verformbarkeit der Lamellen, können sowohl gerade als auch gekrümmte Träger hergestellt werden. Mit Brettschichtholz können zudem Dimensionen geschaffen werden, die unverleimtes Holz nie erreichen würde. Daher ist er derzeit der Werkstoff für den Holzbau, der am meisten im Interesse der Holzforschung und Anwendung steht. Zahlreiche Forschungsprojekte wurden in den letzten Jahren diesbezüglich durchgeführt, um die Frage zu klären, inwieweit Laubhölzer geeignet sind und welche allgemeingültigen Parameter und Kenngrößen festgelegt werden müssen, um eine Herstellung praktikabel zu gestalten und neue Märkte erschliessen zu können (Egner und Kolb 1966, Gehri 1980, Frühwald et al. 2003a, Blaß et al. 2005, Frese 2006)

Beispiele: Bauten mit BSH-Trägern aus Laubholz sind zwar zurzeit noch Exoten angesichts des üblicherweise verwendeten Nadelholzes, jedoch auch keine gänzlich unbekannte Grösse mehr. Carl-Friedrich Wiebeking schuf bereits im 19. Jhd. Brücken aus verklebten Eichenlamellen. Ein bekanntes Beispiel ist die 1809 errichtete Brücke über die Alz in Altenmark. Erste Forschungen dazu fanden in den 1960er Jahren (Egner und Kolb 1966) statt und mittlerweile existieren zudem einige erfolgreiche Anwendungen in Ingenieurbauwerken der Schweiz. Als Pilotprojekte gelten der 1984 errichtete Seeparksaal in Aarbron mit Zug- und Druckstäben aus Buchen-BSH und eine Strassenbrücke in Eggiwil von 1985, die in Teilen aus imprägnierten BSH in Buche besteht. Fichtenholz wäre der Beanspruchung und den auftretenden Kräften nicht gerecht geworden. Ein jüngeres Beispiel besitzt die Schreinerei Schnidrig aus Visp/Schweiz, die sich 2001 die Tragstruktur ihrer Werkhalle aus Eschen-BSH fertigen liess. Hergestellt wurden die Träger von der Firma Neue Holzbau AG in Lungern. Diese haben sich u.a. auf BSH spezialisiert und produzieren neben den üblichen Nadelholz-BSHs auch Varianten aus Esche und Eiche. Die Werkhalle der Schreinerei Schnidrig blieb allerdings bisher die einzige Konstruktion komplett aus Esche, da dem Unternehmen die bisher ausgebliebene Festigkeitsklasseneinteilung für Laubholz-BSH sowie Regelungen für eine leistungsfähige Keilzinkung der einzelnen Lamellen fehlen (Strahm 2009). Daher wird Laubholz mehr zur partiellen Verstärkung von Nadelholz-BSH eingesetzt, wie das Beispiel des Erhaltungs- und Interventionszentrum (EIZ) in Frutigen zeigt, bei der die hohe Festigkeit der Esche im Anschlussbereich genutzt wurde.



Abb. 3-20: Werkhalle mit BSH-Trägern aus Esche der Neuen Holzbau AG (Neue Holzbau AG)



Abb. 3-21: Mit Esche verstärkter Eckanschluss der Neuen Holzbau AG (Neue Holzbau AG)

Die neue bauaufsichtliche Zulassung für Brettschichtholz und Hybridträger aus Buche gewährt auch deutschen Herstellern, Holzbaufirmen und Baurägern mehr Freiräume in der Wahl der Holzart. So plant derzeit die Bayerische Landesforstanstalt für Land- und Forstwirtschaft (LFW) in Freising ein neues Bürogebäude, bei dem ca. 81 m³ Buchenholz zu 34 BSH-Trägern verbaut werden sollen. Das auch von der Wissenschaft begleitete Projekt wäre damit das weltweit erste reale Gebäude dieser Art. Planmässig sollte 2010 mit dem Bau begonnen werden, auf Nachfrage bei der LFW wird dieser Termin jedoch verschoben (Schwab 2010).

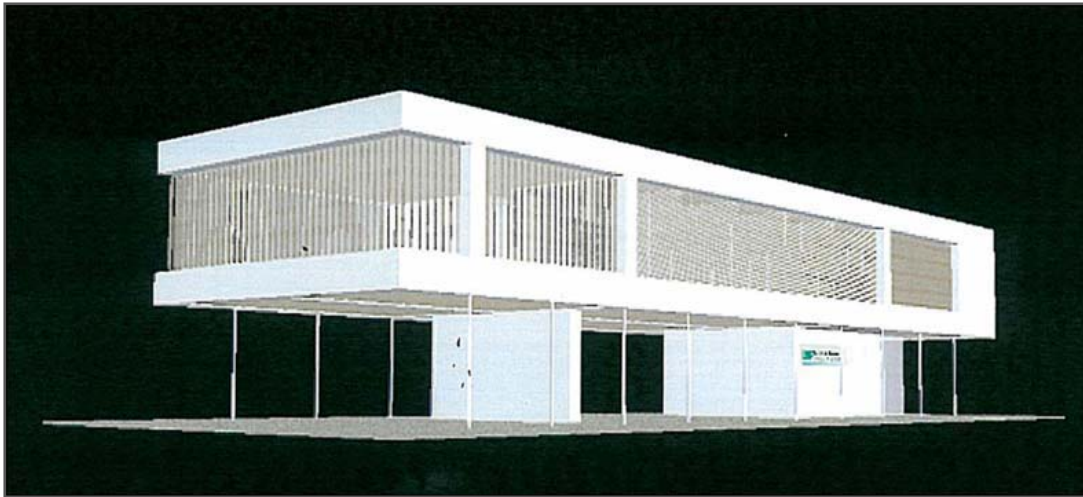


Abb. 3-22: Ansicht des geplanten Bürogebäudes der Bayerische Landesforstanstalt für Land- und Forstwirtschaft mit BSH-Trägern aus Buche (www.waldwissen.net)

Ein Unternehmen ausserhalb der Schweiz, die BSH aus Eiche, Buche und Esche anbieten, ist Maderas Gámiz S.A. im spanischen Sta. Cruz de Campezo. Ihr Lieferprogramm umfasst Träger, die bis zu 400 mm breit, 300 mm hoch und 12 m lang sein können.

Vorschriften für BSH: Generell gilt folgendes für BSH in der Schweiz. Richtlinien der Schweizerischen Fachgemeinschaft für Holzleimbau (SFH) garantieren die Qualität der Herstellung sowie die Einhaltung der in der Norm genannten Eigenschaften. Die vor allem wichtigen Festigkeitsklassen von BSH sind in der SIA 265 (2003) sowie in der SIA 265/1 (2009) geregelt und geben die reinen mechanischen Eigenschaften von BSH wieder. Dafür werden die Lamellen vor der Herstellung von BSH visuell oder maschinell sortiert (siehe 2.16), wodurch die Einordnung in eine der Festigkeitsklassen von C 14 bis C 35 für Nadelholz und D 18 bis D 70 für Laubholz möglich ist. In der SIA 265 werden die ermittelten Festigkeitsklassen der Lamellen in die T-Klassen T 11 (\cong C 18), T 14,5 (\cong C 24), T 18 (\cong C 30), T 22 (extra) und T 26 (extra) umbenannt. Ab T 22 wird die maschinelle Sortierung gefordert. Mit der vorgenommenen Einteilung der Lamellen und Beachtung der nach SIA 265 weiteren Anforderungen an die Keilzinkung und Verklebung kann BSH schliesslich Festigkeitsklassen mit den Bezeichnungen GL 24, GL 28, GL 32 und GL 36 zugewiesen werden, wobei die Zahl die erforderliche Biegefestigkeit des BSHs wiedergibt. Da Hartlaubhölzer wie Buche und Esche von Grund auf höhere Festigkeiten aufweisen, können demnach auch Festigkeitsklassen über GL 36 realisiert werden. In der neuen bauaufsichtlichen Zulassung sind bei maschineller Sortierung Festigkeitsklassen bis GL 48 für BSH und Hybridträger aus Buche angegeben.

Forschung: Die wenig genannten Beispiele zeigen, dass es trotz aller Schwierigkeiten möglich ist, Laubholz für tragende Konstruktionen einzusetzen. Aus den hiesigen Bestrebungen und Forschungsprojekten geht hervor, dass grosses Interesse besteht, dass Tragwerkstrukturen aus Laubholz nicht nur Einzelfälle bleiben. Besonders im Fokus stehen die Hartlaubhölzer Buche, Eiche und Esche. Sie zeichnen sich gegenüber den Nadelhölzern durch deutlich bessere mechanische Eigenschaften aus. Aufgrund höherer Druck-, Querkzug- und Querdrukfestigkeiten können Träger, vor allem die Anschlussleistungen der Verbindungen, deutlich höhere Belastungen aufnehmen. Diese äusserst positiven Voraussetzungen gestatten Holzbauten, die filigraner, aber auch leistungsfähiger sein könnten.

Erste Untersuchungen Laubholz im Holzbau zu verwenden, fanden bereits in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts statt. Egner und Kolb (1966) prüften an drei BSH-Trägern ohne Keilzinkenverbindung die Biegetragfähigkeit und ermittelten Biegefestigkeiten zwischen 65 und 78 N/mm². Bedenken äusserten sie bezüglich der Dauerhaftigkeit und der Wirtschaftlichkeit. Leider wurden die Untersuchungen nicht weitergeführt und auch für längere Zeit nicht aufgegriffen. Erst Gehri (1980) nahm das Thema wieder auf und untersuchte an der ETH Zürich die „Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruktionen“. Schon damals berichtete Gehri von einer wenig zweckmässigen Nutzung der Buche bei geringer Auslastung und forderte daher neue und hochwertigere Anwendungsgebiete. Resultierend aus den Voraussetzungen, um als Tragkonstruktion zu dienen, stellt Gehri fest, dass eine Lösungsvariante die Verwendung verleimter Querschnitte zu Brettschichtholz ist. Besonderer Beachtung schenkte er der Keilzinkung und Verleimung und berichtete von fehlenden Kriterien für die Sortierung. Da er erkennt, dass die Randlamellen bedeutend für die Festigkeit eines Trägers sind, sortiert er die Bretter nach Astigkeit und Faserneigung. Die vier Träger besaßen eine Dimension von (0,50 x 0,12 x 5,40) m; Verleimung, Pressparameter und Aushärtezeit wählte er gleich der Fichte. Die Buchenträger erreichten 25 % höhere mechanische Festigkeiten gegenüber solchen aus Fichte und versagten und brachen nicht bei Reissen der untersten Lamelle infolge der Beanspruchung. Diese höheren Festigkeiten erlauben die Reduktion des Querschnittes und damit des Holzverbrauchs. Nur 80 % des Holzes wären tatsächlich nötig für eine 25 % höhere Biegefestigkeit, 80 % bei Einhaltung gleicher Sicherheit auf Kippen. Nach weiteren Untersuchungen hob Gehri (1985) den Wert sogar auf 30 % an unter der Bedingung einer entsprechenden Kontrolle der Keilzinkenverbindung.

Mit einem breit angelegten Forschungsprojekt zum Thema Brettschichtholz aus Buche beschäftigten sich Frühwald et al. (2003a). Ziel der Studie war die Erarbeitung einer Entwicklungsstrategie von hochwertigem BSH vor allem für den Wohnungs- und Häuserbau. Untersucht wurden dafür 101 sechslagige Träger aus Buche sowie Träger mit zwei Lagen Fichtenlamellen in der Mitte. Die Lamellen waren getrocknet und zum Teil gedämpft. Das Dämpfen erwies sich als positives Mittel, Eigenspannungen in der Buche abzubauen, die Verarbeitbarkeit zu verbessern und die Farbe rotkerniger Bereiche zu egalisieren. Praktischen Vorüberlegungen ist zu entnehmen, dass die Herstellung der Lamellen durch eine vorgeschaltete Verleimung zur Massivholzplatte wirtschaftlicher gestaltet werden kann, die anschliessend auf die gewünschte Lamellenbreite aufgetrennt wird. Das würde zwar den Bearbeitungs- und Leimaufwand erhöhen, jedoch den Ausschuss und somit die Rohstoffkosten senken, da die Längsschnitte so gewählt werden können, dass sie ausserhalb unerwünschter Bereiche liegen. Wie in den vorangehenden Beispielen waren auch in diesem Fall die BSH-Träger aus Buche, aber auch die kombinierten mit Fichtenholz sehr leistungsfähig mit einem mittleren hohen Biegefestigkeitswert von 78 N/mm². Zugversuche an den Keilzinkungen der Lamellen zeigten, dass hochwertige Verbindungen möglich sind, die die Kriterien erfüllen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sehen die Autoren in BSH aus Buche einen Werkstoff, der zwar aufgrund seiner schlechten Dauerhaftigkeit nur im Innenbereich eingesetzt werden, jedoch dort wegen seiner hohen Leistungsfähigkeit mit schlankeren Konstruktionen gegenüber anderen hölzernen Materialien trumpfen kann.

Ein Forschungsvorhaben der Universität Karlsruhe (Blaß et al. 2005) beschäftigte sich mit der Ermittlung von Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten von BSH-Trägern aus Buche unter Zuhilfenahme eines Rechenmodelles. Ein solches Simulationsprogramm wurde schon in den 80er Jahren mit dem Namen „Karlsruher Rechenmodell“ entwickelt, womit das Tragverhalten von BSH-Trägern am Computer bestimmt werden kann. Mit Hilfe dieses Modells war es möglich, Rechenwerte von Festigkeit- und Steifigkeitseigenschaften von BSH aus Nadelholz

für die EN 1194 „Brettschichtholz-Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte“ zu bilden. Allerdings beruht das Modell auf an Nadelholz gewonnenen Werten. Ziel des Projektes war es daher, ein solches Modell für BSH aus Buche zu schaffen. Der Entwicklung dieses Modelles lagen zahlreiche Prüfungen an Brettabschnitten und Keilzinkenverbindungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften zugrunde. Mit daraus hergeleiteten Gleichungen konnte schliesslich ein Simulations- und Finite-Elemente Programm zur Nachahmung von Biegeversuchen an BSH-Trägern entwickelt werden. Zum Vergleich wurden ebenso BSH-Träger hergestellt und geprüft, die eine mittlere Biegefestigkeit von 44,5 N/mm² hatten. Die Ergebnisse glichen denen des Modells, was dessen Eignung bestätigt. Mit den gewonnenen Daten und unter Beachtung der Sortierung war es möglich, Festigkeitsklassen für BSH aus Buche anzunehmen. Je nach Sortierung können Festigkeitsklassen von GL 32 (Sortierklasse LS 13), GL 36 (Äste bis maximal 5 mm) und GL 40 bzw. GL 48 (maschinelle Sortierung nach E-Modul und Äste in Festigkeitsklasse D 50 bzw. D 60) erreicht werden.

Für die Aufstellung charakteristischer Festigkeitswerte fehlte es der vorangehenden Arbeit trotzdem an zuverlässigen Angaben zur charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter und Keilzinkenverbindungen sowie an Werten zur charakteristischen Biegefestigkeit von BSH-Trägern. Das gelang schliesslich Frese (2006). Er untersuchte ebenso BSH-Träger aus Buche experimentell und mit Hilfe des Simulationsprogramms. Jedoch leitete er zusätzlich aus dem Rechenmodell eine Bemessungsgleichung für die charakteristische Biegefestigkeit von Buchenbrettschichtholz her, mit deren Hilfe Festigkeitsklassen festgelegt werden konnten. Eine visuelle Sortierung ist demnach Voraussetzung für charakteristische Biegefestigkeiten bis zu 36 N/mm², eine maschinelle Sortierung nach dem Elastizitätsmodul der Bretter für charakteristische Biegefestigkeiten bis zu 48 N/mm².

Eine Arbeit mit direktem Bezug zu Blaß (2005) und Frese (2006) ist eine Gemeinschaftsarbeit von Blaß und Frese (2006), welche sich mit der Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern auseinandersetzt. Hierbei bestanden nur die Randlamellen aus Buche, die Kernlamellen wurden durch Fichte ersetzt, da dieser Bereich weniger durch Biegung beansprucht wird. Aus den Ergebnissen ging hervor, dass hybride Träger gleiche Festigkeitsklassen wie BSH aus Buche erreichen. Unter Beachtung der Sortierung können Biegefestigkeiten bis 48 N/mm² erreicht werden. Dabei müssen nur 40 % des Trägers aus Buche bestehen, was die Herstellungskosten erheblich senken würde.

Doch nicht nur die Buche erwies sich als geeignete Laubholzart, auch die Pappel zeigte bei Untersuchungen sehr gute Ergebnisse. Neben der hohen Biegefestigkeit von 49,6 N/mm², heben sich BSH aus Pappel besonders durch ihr Äusseres ab. Die helle Farbe wirkt schlicht und edel, die Zeichnung trotzdem lebendig und das Holz ist nahezu astfrei (Härtel 2002).

Kreuzbalken: Kreuzbalken werden wie Brettschichtholz für den tragenden Holzbaubereich entwickelt. Vier viertelholzähnliche Teilstücke werden zu einem Balken verklebt, wobei die Aussenseite der Rundholzsegmente nach innen gewendet wird. Dadurch entsteht innerhalb des Rechteckquerschnittes eine mittige über die Länge des Balkens durchlaufende Röhre. Auch Kreuzbalken werden üblicherweise nur aus Nadelholz gefertigt. Im Prinzip herrschen für die Verwendung von Laubhölzern die gleichen Probleme wie bei Brettschichtholz – keine definierten Festigkeitsklassen, keine angepasste Sortierklassen sowie fehlende Bemessungsgrundlagen für die Verklebung. Mit der Ausnahme von Buche, die seit der bauaufsichtlichen Zulassung durch das DIBt seit Oktober 2009 in Deutschland erlaubt ist.

Duo-/Triobalken: Duo- oder Triobalken bestehen aus zwei bzw. drei kernfreien und keilgezinkten Halbhölzern, die flachseitig miteinander verleimt sind. Eingesetzt werden können sie im Innen- und überdachten Aussenbereich für Bauteile, die formstabil sein

müssen. Durch eine saubere Bearbeitung, glatte Oberflächen und gute Festigkeiten vereinen die Balken Tragfunktionen, Sichtqualität und Vollholzcharakter. Die neue bauaufsichtliche Zulassung gestattet auch diesen beiden Werkstoffen breitere Anwendungsgebiete. Gautschi (2009) untersucht die Anwendung von Triobalken aus Buche im Holzrahmenbau bei dem Umbau eines Bauerhauses in Neuenegg im Zuge einer Machbarkeitsstudie. Er zeigte, dass eine industrielle Herstellung und dank neuentwickelter Schrauben, das Befestigen ohne Vorbohren und schlankere Querschnitte möglich sind sowie problemlos die Wandkonstruktion aussteifende Platten mittels Heftklammern fixiert werden können.



Abb. 3-23: Triobalken für das Bauernhaus bei Neuenegg mit neu entwickelter Schrauben (Gautschi 2009)

3.2.2 Lagenwerkstoffe

Unter diesem Begriff fallen Werkstoffe, die aus mehreren übereinander verleimten Furnier- oder Brettlagen bestehen. Das sind zum einen das Sperrholz in verschiedenen Ausführungen, das Furnierschicht- und Furnierstreifenholz sowie das Kunstharzpressvollholz. In Bezug auf die Laubholznutzung verhält es sich ähnlich wie bei den Vollholzwerkstoffen. Im nichttragenden Bereich sind Produkte aus Laubhölzern gebräuchlich, für den konstruktiven Holzbau existieren Bemühungen, jedoch noch keine bauaufsichtlichen Zulassungen oder angepasste Normen. Eingesetzt werden Lagenwerkstoffe u.a. im Möbel-, Modell-, Laden- und Innenausbau sowie für Träger, Türen oder im Transportwesen. Als Spezialanwendung sind Ski- und Snowboardkerne aus Schichtholz zu nennen. Eine namenhafte Schweizer Firma ist die HESS & CO. AG in Döttingen, die bereits seit 1972 Ski-Kerne aus Schäl furnier herstellt. Vorteil des Kerns ist, dass er im Gegensatz zu Kunststoff seine technischen Eigenschaften auch bei grossen Temperaturschwankungen weitgehend beibehält. 50 % der jährlich ca. 40 Mio. verkauften Skier und 80 % der 1,5 Mio. Snowboards sind mit einem Holzkern ausgestattet. Nach Angaben von Ackermann (2009) verarbeitet das Unternehmen für ihre Produkte, zu denen auch Federleisten, Multiplex- und Fassadenplatten gehören, ca. 18.000 m³ Holz pro Jahr. Den grössten Teil nimmt Laubholz ein, davon etwa 80 % Buche, gefolgt von Pappel, Ahorn und Esche. Das Holz stammt zu 70 % aus der Schweiz, der Rest aus dem süddeutschen Raum und dem Elsass. Neuestes Produkt der Firma sind sogenannte Knotenplatten – bis zu 80 cm starke Platten aus verleimten Furnierschichten. Diese können von Holzbaufirmen individuell in unterschiedliche Dimensionen aufgetrennt werden.

1. Sperrholz

Grundsätzlich besteht Sperrholz aus mindestens drei verleimten Holzlagen, deren Faserrichtung üblicherweise 90° gegeneinander versetzt ist. Die Anzahl der Lagen ist immer ungerade. In der Wahl der Holzart sind die Hersteller relativ frei, solange die Anforderungen

nach DIN EN 636 (2003) erfüllt werden. Neben Nadelhölzern wie Kiefer und Fichte werden für Sperrhölzer auch zahlreiche Laubhölzer in grossen Mengen eingesetzt. Vor allem homogene, zerstreuporige Massenhölzer sind ideal. In der Schweiz ist das Buche, Skandinavien nutzt überwiegend das Holz der Birke. Aufgrund innerer Spannungen (siehe Kapitel 3.2.2.1) wird der Buchenstamm vor dem Entrinden in gesamter Stammlänge gedämpft. Zudem gibt es Varianten aus Mittellagen in Fichte und Deckschichten in Buche. Nach DIN EN 313-1 (1996) erfolgt die Klassifizierung von Sperrholz folgendermassen:

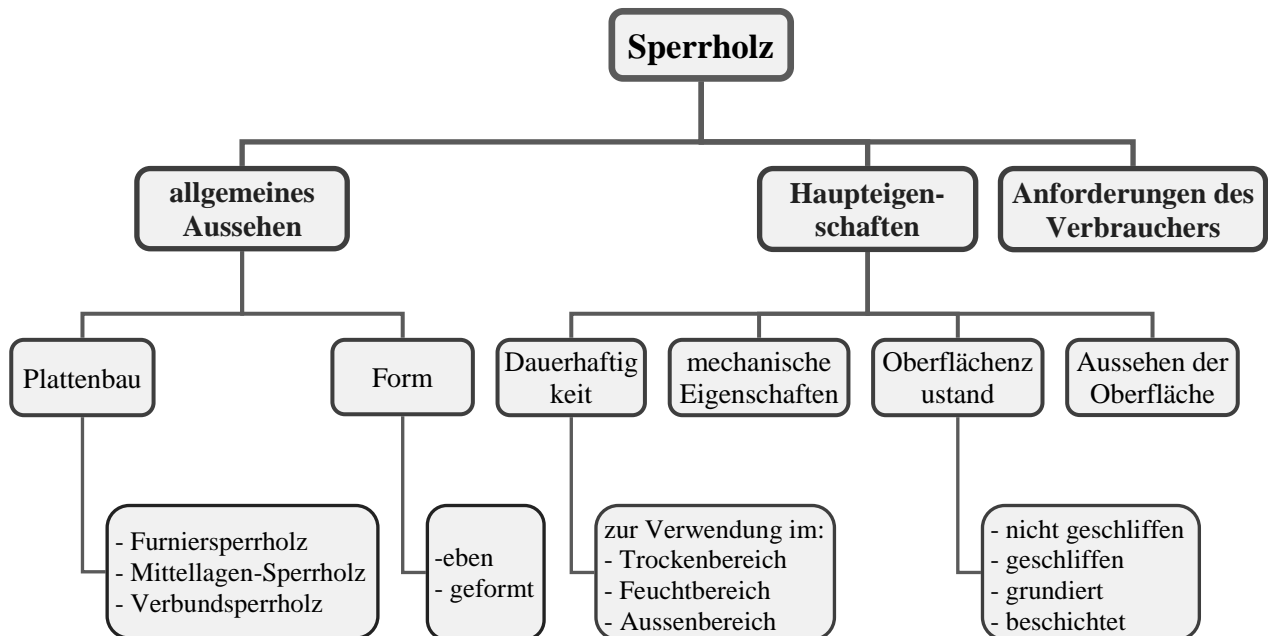


Abb. 3-24: Klassifizierung des Sperrholzes (DIN EN 313-1 1996)

Für **Furniersperrholz** werden mehrere parallel zur Plattenebene verlaufende Schäl furnierlagen aufeinander geleimt. Erhältlich ist der Werkstoff in Dicken von 3 – 50 mm und wird ab fünf Lagen und einer Dicke von 12 mm Multiplexplatte genannt. Quellen und Schwinden werden aufgrund der kreuzweisen Verleimung erheblich reduziert, so dass sich Furniersperrholz durch eine hohe Festigkeit, Masshaltigkeit und Formbeständigkeit auszeichnet. Daher findet es Verwendung in der Baubranche, Möbel- und Innenausbau, Transportwesen, in der Fussboden- und Verpackungsindustrie. Eine Sonderform ist das **Biegesperrholz** aus einer sehr dünnen Schäl furniermittelschicht und zwei dickeren Decklagen, wodurch es wie der Name schon verrät parallel zur Faserrichtung der Mittellage leicht zu biegen ist. Einsatzmöglichkeiten gibt es überall dort, wo runde Formen gefragt sind, z.B. im Fahrzeug-, Theken- und Messebau sowie als Verkleidung von Säulen. Mit **Formsperrholz** lassen sich ebenso geschwungene Produkte realisieren. Im Gegensatz zum Biegesperrholz jedoch werden die Schäl furnierlagen gleich während der Verklebung unter Hitze und hohem Druck in die gewünschte Form gepresst. Formsperrholz weist eine hohe Festigkeit bei geringem Gewicht auf, wodurch es ein idealer Werkstoff für Sitzschalen, Lehnen, Bettfederleisten, Schlittenkufen, Sportartikel sowie den Fahrzeug- und Innenausbau ist.

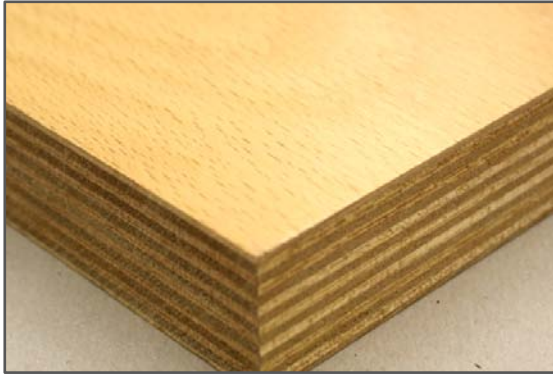


Abb: 3-25: Furniersperrholz (Verena Krackler)

Unter **Mittellagen-Sperrholz** fallen Platten, bei denen die zentrale Lage meist dicker als die restlichen und an den Schmalflächen der fertigen Platte sichtbar ist. Es wird von **Stabsperrholz** gesprochen, wenn diese Mittellage aus höchstens 30 mm breiten Holzleisten besteht, die dicht nebeneinander liegen. **Stäbchensperrholz** dagegen ist aus höchstens 7 mm dicken, hochkant zur Plattenebene stehenden Schäl furnierstreifen aufgebaut.

Verbundsperrholz setzt sich aus Decklagen in Furniersperrholz und Mittellagen aus einem anderen Material zusammen. Dies können z.B. Waben aus Kunststoff, Metall, Papier/Pappe sowie Kork und Polyurethanschaum sein, für die Verwendung im Türen- und Möbelbau, als Fertighauswände oder Füllungen von Haustüren und Fenstern.

Allerdings ist die Sperrholzerzeugung seit einigen Jahren in der Schweiz rückläufig. Von 2001 bis 2007 sank diese von 19.000 m³ auf 6.000 m³. Grund dafür ist die Verlagerung der Produktion in osteuropäische Staaten wie Slowenien, Tschechien oder Rumänien. Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern wird in der Schweiz eher wenig Sperrholz produziert. Seit 2007 existiert in der Schweiz nur noch ein Furnier- und ein Sperrholzwerkwerk (BAFU 2009). Entscheidend für gute Sperrhölzer sind eine hohe Güte der Furniere und damit des Stammholzes, welches der Schweizer Wald nur mässig zu bieten hat. Eine Mobilisierung ist demnach fraglich. Dennoch sollte geprüft werden inwieweit sich das Holz für Bereiche eignet, bei denen die Oberflächeneigenschaften zweitrangig sind.

2. Brettsperrholz (BSP)

Brettsperrholz ist eigentlich das grosse Geschwisterkind des Furniersperrholzes. Der Aufbau ist der gleiche - mindesten drei oder mehr kreuzweise verlegte, flächig miteinander verklebte Holzlagen- allerdings unterscheiden sie sich bezüglich der Dimensionen. Die einzelnen Lagen, auch Brettlagen genannt, sind stärker und ermöglichen somit Gesamtdicken bis zu 500 mm. Mit Breiten um die 3 m und Längen um die 16 m werden auch bei weitem die flächigen Ausmasse einer Massivholzplatte überragt. Das gestattet ein breiteres Anwendungsfeld mit der Nutzung bei statisch beanspruchten Bauvorhaben. Gerade im Hausbau bietet sich BSP für ausladende Vordächer, grosse Spannweiten, kubische Formen und somit für eine Holz-Massivbauweise an. Im Gegensatz zum einfachen Sperrholz existiert für Brettsperrholz bisher keine gültige europäische Norm, so dass es zwischen den Anbietern mitunter zu erheblichen Qualitätsunterschieden kommen kann. Für die Herstellung von BSP wird zurzeit ausschliesslich Nadelholz verwendet, zumindest konnte zum Zeitpunkt der Erstellung der Recherche kein Hinweis auf eine Laubholznutzung gefunden werden. Da jedoch Sperrholz aus Laubholz möglich sind, könnte dies für BSP ebenso gelten. Aus Untersuchungen von Gehri (1993) geht hervor, dass Furniersperrholz aus Buche aufgrund der hohen Dichte des Holzes um ein Drittel höhere Zugfestigkeiten im Gegensatz zu Fichte, Kiefer, Douglasie und

Seekiefer erreicht. Für eine Realisierung wird es vor allem wichtig sein, wie bei weiteren Produkten für den Holzbau aus Laubholz, geeignete Klebstoffe und Verklebungsparameter bereitzustellen, die den Ansprüchen und der Anatomie des Laubholzes gerecht werden (siehe Kapitel 2.1.4). Aigner et al. (2009) entwickelten einen Prototyp einer Keilzinkenanlage, bei der Randzinkenfräser eingesetzt wurden, die ein grösseres Zinkenspiel als bisherige Fräser aufwiesen. Dieses Verfahren bewirkte eine Erhöhung der Biegebruchfestigkeit um 10 % über den Querschnitt der BSP-Platte.

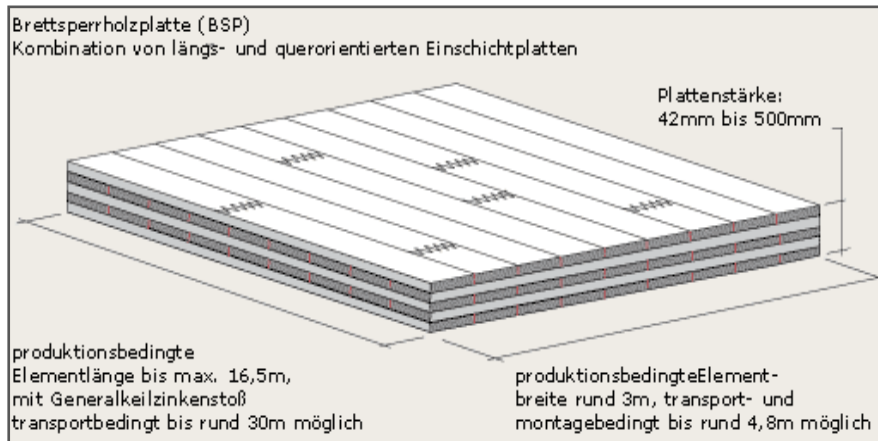


Abb. 3-26: Aufbau und Kennwerte von Brettsperrholz (pro:Holz)

3. Kunstharz-Pressholz

Hinter der Bezeichnung verbergen sich sehr dünne, mit Kunstharz imprägnierte Schäl furniere, die unter Druck und Temperatur hoch verdichtet werden. Ergebnis ist ein Werkstoff, der hervorragende physikalische Eigenschaften wie hohe Biegefestigkeiten und Steifigkeiten aufweist und damit sehr strapazierfähig, form- und verschleissfest ist. Festigkeiten vergleichbar mit Metallen bei sehr geringem Gewicht zeichnen Kunstharz-Pressholz ebenso aus wie Temperatur-, Wasser-, Chemikalienbeständigkeit und eine problemlose Entsorgung. Weiterer Vorteil ist eine leichte Bearbeitung mit Werkzeugen aus Holz- und Metallbereich. Diese Fülle der positiven Eigenschaften spiegelt sich auch in den Einsatzgebieten wieder. Ideal ist der Werkstoff für den Fahrzeug-, Prototypen- und Werkzeugbau. Gefertigt werden u.a. Rundstäbe, Gewindestangen, Muttern, Bauteile für Loktransformatoren, Trafobaugruppen und den Hochspannungsbereich.

Entwickelt wurde Kunstharz-Pressholz in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts aus der Pressstoffindustrie, die herausfanden, dass sich die üblichen Ausgangsstoffe Gewebe, Papier und Pappe auch in ihrer ursprünglichen Form als Holz furnier schichten und pressen lassen. Wichtig für die Qualität von Kunstharz-Pressvollholz sind die Menge des Kunstharzes, ausreichende Pressdrücke und angepasste Temperaturen. Harzgehalte unter 8 % reichen nicht für eine ausreichende Bindung der Furniere, Werte von 8 – 12 % ergeben die höchste mechanische Festigkeit, zwischen 30 – 40 % die bestmögliche Feuchtigkeitsbeständigkeit und ab 60 % entstehen sehr druckfeste Presshölzer (Kollmann 1951). Von Anfang an wurde und wird auch heute noch überwiegend Buche eingesetzt. Weiterhin eignen sich auch noch andere zerstreutporige Laubhölzer wie Birke, Gelbbirke und Zuckerahorn; ringporige Laubhölzer wie Esche und Eiche sind nicht verwendbar. Weniger tauglich sind Nadelhölzer. Bei Versuchen kam es zu einer starken Wellenbildung der einzelnen Lagen, da Früh- und Spätholz unterschiedlich stark verdichtet wurden, was zu erheblichen Streuungen in den Festigkeitswerten führen kann (Kollmann 1951). Damit ist Kunstharz-Pressholz einer der wenigen Werkstoffe, bei dem sich Laubhölzer, speziell die Buche vollständig etabliert haben.



Abb. 3-27: Kunstharz-Pressholz (Verena Krackler)

4. Furnierstreifenholz (Parallel Strand Lumber – PSL)

Furnierstreifenholz wurde ursprünglich in den USA unter den Namen Parallam entwickelt. Reste von Furnieren aus der Sperrholzproduktion wurden verleimt und daraus schliesslich ein stabförmiger Holzwerkstoff mit Rechteckquerschnitt geschaffen. Mittlerweile werden die ca. 3 mm dicken Schäl furnierstreifen gütesortiert und besitzen eine ungefähre Breite von 15 mm und eine Länge von 2,6 m. Die Streifen werden mit Phenol-Formaldehydharz beleimt, in der Länge versetzt parallel zur Balkenlängsachse gebündelt, zu Endlosbalken gepresst und in der Länge aufgetrennt. Die Herstellung erfolgt ausschliesslich in den USA und aus Nadelholz der amerikanischen Douglasie (Douglas fir) sowie Kiefer (Southern yellow pine). Aufgrund seiner hohen Festigkeit und Formstabilität ist PSL ähnlich BSH für Bauteile und Tragwerke mit grosser Spannweite geeignet, so dass es nach DIN EN 1052 überall dort eingesetzt werden kann, wo die Verwendung von BSH erlaubt ist. Eine Verwendung im tragenden Bereich ist durch die seit 1997 gültige bauaufsichtliche Zulassung ohne Probleme möglich.

Hinweise auf die Nutzung von Laubhölzern für PSL waren zum Zeitpunkt der Recherche nicht zu finden. Hintergrund könnte sein, dass PSL ausschliesslich in den USA produziert wird und dort eine andere Waldbestandessituation sowie Baumartenzusammensetzung herrscht. Hinzu kommt, dass für PSL keine europäische Norm existiert, somit Bemessungsgrundlagen für Festigkeitswerte, Sortierung und Verklebung nicht nur für Laubholz wie bei BSH, sondern auch für Nadelholz fehlen.



Abb. 3-28: Furnierstreifenholz (Verena Krackler)

5. Furnierschichtholz (Laminated Veneer Lumber – LVL)

Grundsätzliches: Unter Furnierschichtholz (LVL) werden platten- oder balkenförmige Holzwerkstoffe verstanden, die aus mehreren meist faserparallel verklebten maximal 6 mm dicken Furnieren bestehen, aus denen Elemente für den tragenden Holzbau geschaffen werden können. Durch dichtschiessende versetzt angeordnete Schäftungsfugen zwischen den Furnieren werden Holzfehler und produktionsbedingte Schwachstellen besser über den Werkstoff verteilt. Kombiniert mit der feinen Lamellierung wird eine hohe Vergütung des Holzes erreicht, was geringe Streuungen in seinen Eigenschaften zeigt. Sehr gute Festigkeiten sowie vermindertes Quell- und Schwindverhalten zeichnen ihn ebenso aus wie Formstabilität. Da auch schon mit kleineren Querschnitten grosse Festigkeiten erreicht werden, kann LVL überall dort eingesetzt, wo die Abmessungen von Brettschichtholz zu gross wären.

Auch Furnierschichtholz blickt schon auf eine längere Entwicklungsgeschichte zurück. Ursprünglich stammt es aus dem Flugzeugbau der 20er Jahre des 20. Jahrhunderts. Industriell gefertigt wird LVL seit 1970 unter dem Namen Microllam in den USA. In Europa war es das Unternehmen Finnforest, welches 1981 eine industrielle Fertigung mit Kerto-Furnierschichtholz für den Einsatz im Holzbau startete. Es werden zwischenzeitlich drei Varianten von Kerto angeboten – Kerto S, Kerto Q und Kerto T. Während bei Kerto S und Kerto T alle Lagen faserparallel sind, werden bei Kerto Q einzelne Furnierschichten mit ihrer Faserstruktur systematisch rechtwinklig zur Produktionsrichtung angeordnet. Dieses Vorgehen führt zu unterschiedlichen Eigenschaften und damit Verwendungsmöglichkeiten: Kerto S und Kerto T sind ideal für stab- und Kerto Q für plattenförmige Produkte. Kerto Furnierschichtholz wird bis zum jetzigen Zeitpunkt nur aus europäischer Fichte oder Kiefer gefertigt. Im Gegensatz zum Möbelsektor, wo Laubhölzer bereits seit längerem eingesetzt werden, ist die Verwendung für statische Zwecke noch nicht üblich, allerdings nicht unmöglich. In den Normen für Furnierschichtholz DIN EN 14279 „Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen“ (2009) und DIN EN 14374 „Holzbauwerke –Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen“ (2005) werden keine Holzarten vorgeschrieben. Die zu erfüllenden Anforderungen wie Festigkeit, Verklebung, biologische Resistenz werden nach genormten festgelegten Prüfverfahren bestimmt.

Beispielhaft für eine Furnierschichtholz aus Buchenfurnier können die von der HESS & CO. AG im Auftrag der Holzbau Amann GmbH aus Weilheim-Bannholz (D) gefertigten Knotenplatten genannt werden. Dabei handelt es sich um aus ca. 2,5 mm dicken Buchenfurnierlagen 81 cm starke Platten mit Längen bis zu 170 cm und Breiten bis zu 62 cm. Realisiert wird dies durch eine Blockverleimung, bei der vorgefertigte 60 mm starke Platten durch einzelne Furnierlagen, welche einen beidseitigen Klebstoffauftrag aufweisen, unter Druck miteinander verpresst werden. Ähnlich Kerto Q werden einzelne Furnierlagen systematisch rechtwinklig angeordnet. Aus der Platte werden mittels CNC-Fräsung die von der Holzbau Amann GmbH benötigten Querschnitte ausgearbeitet. Es handelt sich hierbei um ein relativ neues Produkt und soll in Kürze für einen Kuppelkonstruktion eines grossen Energiekonzerns verwendet werden. Hierbei sollen die Bauteile als Anschlüsse zwischen den dreiecksförmigen Stäben dienen und die an diesen Stellen auftretenden Druckkräfte aufnehmen. Hilfreich ist dabei die Querverleimung einzelner Lagen, die den Knotenplatten eine höhere Druckstabilität als BSH verleihen. Noch wurde mit dem Kuppelbau nicht begonnen. Gewartet wird auf die Freigabe des Statikers, der die Konstruktion derzeit auf Sicherheit und Zuverlässigkeit prüft (Lang 2010).



Abb. 3-29: Ausschnitt einer Knotenplatte aus Buchenfurnier der Hess & CO. AG (Verena Krackler)

Zur Verwendung von Laubhölzern existieren zahlreiche Untersuchungen. Generell ist zu unterscheiden zwischen Untersuchungen von Furnierschichtholz im (konstruktiven) Holzbau und für den Möbelbau. Besonders viele Studien fanden im Herkunftsland Nordamerika statt. Gründe für den Einsatz von Laubhölzern in LVL waren hier zum einen der ebenso sinkende Vorrat an Nadelhölzern (Ozarska 1999) sowie die Nutzung des Werkstoffes in der Möbelindustrie, wo andere Oberflächenqualitäten erforderlich sind (Vlosky et al. 1994). Holzarten, die besonders im Interesse der Forschung standen waren Espe (aspen), Pappel (poplar), die amerikanische Roteiche (northern red oak), der Rotahorn (red maple) sowie der Tulpen- (yellow-poplar) und amerikanische Amberbaum (sweetgum). Auch die asiatischen Länder China, Japan, Malaysia sowie Australien und Europa führten Forschungsprojekte zum besagten Thema durch.

Forschung Möbelbau: Untersuchungen in Nordamerika zeigten, dass LVL aus dickem rundgeschältem Roteichenfurnier für Innenrahmen von Polstermöbeln aus wirtschaftlicher Sicht geeignet ist, die Bearbeitbarkeit ähnlich der von Eichenvollholz ist und die mechanischen Eigenschaften denen von Pappel gleichen; einer im Rahmenbau für Möbel üblichen Holzart (Hoover et al. 1978; Eckelman et al. 1979; Hoover et al. 1979). In einer anderen Studie diskutierten Hoover et al. (1987a) die Absatzmärkte von LVL mit Laubholz im Möbelbereich. Hauptaugenmerk lag dabei auf Produkten, bei denen einige Seiten der Oberfläche sichtbar sind wie Sofagestelle, Stühle, Küchenschränke, (Bücher-) Regale und Betten. Sie stellten fest, dass Produkte, die Elemente mit Längen von mindestens 46 inches (≈ 1.17 m) erfordern, besonders lohnenswert für Produktionen im Inland und Exporte in Ausland sind. Hoover et al. (1987b) untersuchten weiterhin den Einfluss der Holzart, Anzahl der Furnierschichten, Größe und Lage von Fehlstellen sowie Grad und Lage von Querfasern. Dafür wurden Furnierschichtholzplatten aus Roteiche, und amerikanischen Amberbaum hergestellt. Heraus kam, dass Holzart, Anzahl der Lagen und der Faserwinkel die Biegefestigkeit und E-Modul signifikant beeinflussen. Die Rohdichte einer Platte war höher als die des Vollholzes aus der Literatur. Ein Zusammenhang zwischen Plattenrohichte einer Holzart und den mechanischen Eigenschaften wurde nicht erkannt. LVL aus Roteiche zeigte trotz der höchsten Plattenrohichten geringere Biegefestigkeits- und E-Modulwerte, während die vom Tulpenbaum und amerikanischem Amberbaum leicht anstiegen. In einem dritten Beitrag von Hoover et al. (1988) stellen die Wissenschaftler Arbeitsverfahren, deren

Auswirkung auf die Übertragung auf LVL sowie ein Modell für kostengünstiges Laubholz-LVL mit konventionellen Betriebseinrichtungen aus der Sperrholzproduktion vor.

Die mechanischen Eigenschaften von LVL aus Eiche und Birke für Möbelgestelle erforschte ebenso das Hokkaido Research Institute in Japan, welche im Gegensatz zu Vollholz geringer waren. Besonders Die Scher- und Spaltfestigkeit war bedeutend kleiner. Gründe wurden in Defekten durch das Schälmesser vermutet (Watanuki et al. 1983).

Forschung Holzbau: Untersuchungen von Laubhölzern in LVL für den Holzbau fanden in Nordamerika überwiegend mit Arten statt, die eine geringe bis mittlere Rohdichte aufweisen. Mit Pappel und Espe als vorherrschende Baumarten wurden besonders viele Projekte durchgeführt, aber auch Silberahorn (silver maple), Tulpenbaum und Roteiche wurden geprüft. Die Durand-Raute Industries LTD. (1988) ermittelte höhere Biegefestigkeiten, aber geringere Steifigkeiten von LVL aus Espe im Gegensatz zu LVL aus Kiefer. Verbesserungen wurden durch eine angemessene Verdichtung erreicht, ausserdem erwiesen sich halbstumpfe Verbindungen als ausreichend. Hsu (1988) zeigte auf, dass die Biegeeigenschaften von LVL aus Espe vergleichbar mit denen aus Nadelhölzern sind, sogar geringe Qualitäten von Espe hatten respektable Festigkeitseigenschaften. Durch das Erwärmen des Furniers vor dem Verkleben kann die Presszeit bei dicken LVLs verkürzt werden (Steiner und Andersen 1982). Chui et al. (1994) untersuchten, inwieweit sich die Eigenschaften von LVLs aus Pappel verbessern lassen, wenn die Furniere mit Harz imprägniert werden. Die mechanischen Eigenschaften konnten erhöht werden durch eine Imprägnierung aller oder nur der äusseren Schichten mit Phenol-Formaldehydharz. Untersuchungen zum Einfluss der Presszeiten auf mit vernetzten Polyvinylacetat verklebten Furnierschichtholz aus Espe, amerikanischen Tulpenbaum und Silberahorn führten Shukla und Kamdem (2008) durch. Es wurden Dichte, Wasserabsorption, Dickenquellung, Biegefestigkeit und Oberflächenhärte bestimmt. Die besten Eigenschaften wies das LVL aus Silberahorn bei einer Presstemperatur von 38 °C und einer Pressdauer von 5 Minuten auf. Aus den Ergebnissen schlussfolgerten die Autoren, dass LVL aus Silberahorn ein gutes Material für Bodenbeläge wäre. In keiner nordamerikanischen Studie waren allerdings Untersuchungen zum Einsatz von Hartlaubhölzern sowie Eignungen für den konstruktiven Holzbau zu finden.

Auch die Forschungsprojekte in Asien konzentrierten sich hauptsächlich auf die Nutzung von schnellwachsenden Laubhölzern mit niedriger und mittlerer Dichte, die geringe Durchmesser aufwiesen und meist Plantagen entstammen. Wissenschaftler in Australien dagegen untersuchten die Eignung von Eukalyptus, einer sehr dichten Holzart. Als problematisch erwies sich die Verklebung aufgrund des hohen Extraktstoffanteils. Eine Lösung waren Additive, die die Klebfähigkeit von Eukalyptusfurnieren für LVL im konstruktiven Bereich ermöglichten.

Untersuchungen in Europa zum besagten Thema sind noch rar. Nichtsdestotrotz sind Bemühungen erkennbar. Ein Gemeinschaftsprojekt mit dem Namen ELVE (European Laminated Veneer Engineering) untersuchte die Eignung von Zerreiche, Pappel, Erle, Birke und Buche, zu dem jedoch keine detaillierten Informationen erhältlich sind. Zudem untersuchte Gehri (1993) versuchsmässig hergestelltes FSH aus Buche und zeigte, dass mit dieser Holzart erheblich höhere Zugfestigkeiten möglich sind. Im Gegensatz zu Kerto-S mit Werten um 37 N/mm² wurden mit Buche Zugfestigkeiten um die 70 N/mm² ermittelt. Gehri wies daneben nach, dass die Ausbildung der Längsstösse entscheidend Einfluss auf die Festigkeiten haben. Mit geschäfteten Längsstössen lassen sich höhere Festigkeitswerte als mit Stumpfstössen erlangen. Demnach ist FSH aus Buche bestehend aus Furnieren, die untereinander in Längsrichtung mittels Schäftung verbunden sind, ein idealer Werkstoff für den konstruktiven Holzbau.

3.2.3 Spanwerkstoffe

Die Kapitel 3.2.3 und 3.2.4 entstanden in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. A. Hurst der BFH-AHB Biel und entstammen dem Bericht:

Krackler V., Hurst A., Keunecke D., Niemz P. (2010). Untersuchungen zur Verwertung von bei Laubholz anfallenden Holzresten. Abschlussbericht. Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2008.10.

Mit einem Produktionsvolumen von 40,1 Mio. m³ im Jahre 2008 ist die Spanplatte mit 61 % dominierend unter den Span- und auch Holzwerkstoffen in Europa. Auch in der Schweiz führte sie die Produktion mit 540.000 m³ im Jahre 2007. Zudem ist die Spanplatte weltweit verbreitet und (bei jährlich steigendem Verbrauch). Charakteristisch für alle Spanwerkstoffe ist die plattenförmige Struktur, hervorgerufen durch das Verpressen von Spänen (meist aus Holz, selten auch aus holzähnlichen Faserstoffen wie Flachsschäben, Hanf oder Stroh) mit Bindemitteln. Vorteil aller Spanwerkstoffe ist, dass die Produktion mit weniger qualitativen, preiswerten Rohholz sowie Industrie- und Restholz möglich ist. Spanwerkstoffe bestehen zum überwiegenden Teil aus Nadelhölzern. Laubhölzer, wie Buche, Eiche, Erle, Esche, Pappel und Kastanie werden zwar auch, jedoch in viel kleineren Mengen beigemischt. Eine Erhöhung des Laubholzanteils wäre möglich, das bezeugen vergangene und aktuelle Untersuchungen (Buschbeck 1961; Klauditz 1952; Kehr 1962b).

Eine Variante der Klassifizierung spanbasierter Werkstoffe liefert die DIN EN 309 (2005) mit folgender Einteilung:

- ◆ Herstellungsverfahren (flach-, kalander-, stranggepresst)
- ◆ Oberflächenbeschaffenheit (roh, geschliffen oder gehobelt, flüssig- oder pressbeschichtet)
- ◆ Form (flach, mit profilierter Oberfläche, mit profilierten Schmalflächen)
- ◆ Grösse und Form der Teilchen (Holzspanplatte, Platte aus anderen Spänen)
- ◆ Plattenaufbau (ein-, mehrschichtig, mit stetigem Strukturübergang, stranggepresste Platte mit Röhren)
- ◆ Verwendungszweck (allgemeine Zwecke, Inneneinrichtung im Trockenbereich, nicht tragende Zwecke im Feuchtbereich, tragende Zwecke im Trocken- und Feuchtbereich, hoch belastbare Platten im Trocken- und Feuchtbereich)

Hauptvertreter der Werkstoffgruppe ist bislang zweifelsohne die konventionelle Spanplatte, jedoch finden auch Spezialsortimente wie OSB (Oriented Strand Board) oder mineralgebundene Spanplatten immer breitere Anwendungsgebiete. Im Folgenden werden einzelnen Kategorien vorgestellt, Forschungsergebnisse von Produkten bestehend aus einer einzigen Laubholzart und Mischprodukten aus Nadel- und Laubholz beschrieben und wenn möglich Produkte aufgeführt, in denen Laubhölzer schon erfolgreich verwendet werden.

1. Die klassische Spanplatte

Grundsätzliches: Hauptrestprodukt für die Herstellung von Spanplatten sind Holzspäne und Hackschnitzel. Veröffentlichungen aus der Mitte des 20. Jahrhunderts bezeugen, dass schon zu damaliger Zeit aufgefordert oder nach Lösungen gesucht wurde, um der Verknappung der Nadelhölzer entgegenzuwirken (Buschbeck et al. 1961; Klauditz 1952; Klauditz 1955). Das belegt, dass die derzeitige Rohstoffsituation der Nadelhölzer keine Erscheinung der heutigen Zeit, sondern bereits seit Jahrzehnten thematisiert wird.

Industriell hergestellt wurden Spanplatten aus Laubhölzern, speziell aus Buche, bereits im Jahr 1951. Das Werk Bučina in der ehemaligen Tschechoslowakei gilt als Geburtsstätte der sogenannten Bucas-Spanplatten aus Buchenrohholz mit einer jährlichen Produktionskapazität von 15.000 m³. Auch in der Bundesrepublik Deutschland, besonders in Niedersachsen, wurden um 1960 beträchtliche Mengen an Buchenholz zur Anfertigung von Spanplatten genutzt. Ebenso verarbeiteten zwei Spanplattenwerke der ehemaligen DDR zu dieser Zeit Buchenrestrollen der Furnier-Industrie sowie Buchenreste der Industrie. Derzeit werden Laubhölzer den Spanplatten beigemischt. Die Buche ist auch hier die meist verwendete Holzart. Die Kronospan Schweiz AG, einer der wichtigsten Holzwerkstoffhersteller der Schweiz, verarbeitet jährlich ca. 850.000 m³ Holz, davon immerhin 40 % Laubholz bei einem ungefähren monatlichen Verbrauch von 5.000 – 20.000 m³, meist Buche (Howald 2009a; Howald 2009b). Der durchschnittliche Anteil an Laubholz des österreichischen Holzwerkstoffherstellers Fritz Egger GmbH & Co. lag 2008/2009 mit 8 % deutlich darunter. Das liegt aber auch daran, dass nach Angaben des Unternehmens viel Laubholz aus der Schweiz bzw. Süddeutschland importiert werden musste (Karbun 2009).

Forschung: Tab. 3-6 zeigt eine Auswahl von Untersuchungen, die im Laufe der Jahre zum Einsatz von Laubholzresten in Spanplatten durchgeführt wurden. Im Anschluss werden diese näher erläutert.

Tab. 3-6: Untersuchungen zum Einsatz von Laubholz in der klassischen Spanplatte (Klauditz 1952; Klauditz und Buro 1960; Buschbeck et al. 1961; Kehr 1962b; Kehr und Schilling 1965a, b; Grigoriou 1981; Vos und Kharazipour 2008)

Untersuchungen			
Autor(-en)	Jahr	Aufbau/ Holzarten	Ergebnis
Klauditz W.	1952	einschichtige Spanplatten aus verschiedenen Holzarten	- Erhöhung der Plattenrohichte für ausreichende Festigkeiten
Klauditz W.; Buro A.	1960	einschichtige Spanplatten aus Spangemischen	- Abhebe- und Biegefestigkeit nehmen mit steigendem Buchenanteil ab
Buschbeck L. et al.	1961	dreischichtige Spanplatten aus Kiefer oder Buche sowie Kombinationen aus Kiefer-Deckschichten und Buchen- bzw. Kiefer/ Buchen-Mittelschichten	- höhere Abhebe-, geringere Biegefestigkeiten der Buchenspanplatten - Erhöhung der Plattenrohichte für ausreichende Festigkeiten - hohe Ausbeute an Buchenspanmasse je Schichtfestmeter
Kehr E.	1962	dreischichtige Spanplatten aus Erle	- für Deck- und Mittelschichten geeignet, Werte ähnlich wie Kiefernspanplatten
Kehr E.; Schilling W.	1965	dreischichtige Spanplatten aus Birke	- geringere Biege- und Abhebefestigkeiten, deutlich höhere Dickenquellung als Kiefernspanplatten
Kehr E.; Schilling W.	1965	dreischichtige Spanplatten aus 25-100 % Eichenspänen in der Mittelschicht	- ähnliche Rohdichte-, Biegefestigkeits- und Abhebefestigkeitswerte wie Kiefernspanplatten
Grigoriou A.	1981	dreischichtige Spanplatten mit Deckschichten aus Rotbuche, Eiche, Pappel, Hainbuche und Mittelschichten aus Rotbuche	- Deckschichten aus Eiche: beste Abhebefestigkeiten - Deckschichten aus Buche: niedrigste Biege-, aber höchste Quersugsfestigkeiten - beinahe alle Werte erreichen heutige Anforderungen
Vos H.; Kharazipour A.	2008	dreischichtige Sandwichplatten mit Mittelschichten aus Buchenspänen	- Erfüllung der Anforderungen für tragende Zwecke im Trockenbereich bereits ab einer Plattenrohichte von 600 kg/m ³

Klauditz (1952) führte Untersuchungen an einschichtigen Spanplatten durch, die aus Spangemischen aus Buche und Fichte bestanden. Er fand heraus, dass zwar zur Erlangung ausreichender Festigkeiten bei Buchenspanplatten eine Erhöhung der Plattenrohddichte notwendig ist, jedoch im allgemeinen Buchenholz gut geeignet ist und zudem den Vorteil besitzt, dass höhere Ausbeuten je eingesetzten Kubikmeter erzielt werden können. Weitere Untersuchungen (Klauditz et al. 1960) zeigten, dass mit steigendem Buchenholzanteil die Abhebefestigkeit sowie die Biegefestigkeit abnehmen, die Dickenquellung jedoch nur gering verändert wird.

Auf der Grundlage der Ergebnisse von Klauditz führte das heutige Institut für Holztechnologie Dresden (IHD) „Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und Sortimente zur Herstellung von Spanplatten“ unter der massgeblichen Leitung von E. Kehr durch. Neben dem Einfluss des Hydrophobierungsmittels und des Härteranteils wurden die technischen Eigenschaften von Mittelschichten aus verschiedenen Laubhölzern wie Rotbuche, Eiche, Pappel, Erle und Birke und Ulme geprüft. Wegen struktureller Unterschiede ist es für ein optimales Ergebnis wichtig, die Prozessbedingungen wie z.B. Verleimung, Presstechnik und Hydrophobierung der jeweiligen Holzart anzupassen (Kehr 1962a; Kehr und Schilling 1965b). Zur Herstellung eignen sich alle genannten Holzarten und Mischungen, entscheidend für eine gleichmässige Plattenqualität sind allerdings konstante Mischungsverhältnisse. Die wichtigsten Ergebnisse zu einzelnen wichtigen Laubholzarten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Buche: Buschbeck, Kehr und Jensen (1961) führten im Gegensatz zu Klauditz die Untersuchungen an dreischichtigen Platten durch, da hierbei mit den Faktoren Bindemittelanteil, Wasserhaushalt und Spandicke die Qualität der Spanplatte sowie die Rohdichteverteilung in den einzelnen Lagen beeinflusst werden kann. Zudem wollte man damit der Abnahme der mechanischen Platteneigenschaften bei der Verwendung von schweren Laubhölzern entgegenwirken. Es wurden dreischichtige Platten allein aus Kiefer oder Buche sowie Kombinationen aus Kiefer-Deckschichten und Buchen- bzw. Kiefer/Buchen-Mittelschichten angefertigt. Im Gegensatz zum einschichtigen Aufbau bei Klauditz, wies der dreischichtige einen Zusammenhang zwischen Ausgangsrohddichte der Holzart und Abhebefestigkeit auf. Die Kiefernspanplatten besaßen geringere Abhebefestigkeiten als die Buchenspanplatten. Übereinstimmungen zu den Ergebnissen von Klauditz gab es allerdings bei der Biegefestigkeit. Spanplatten aus Hölzern höherer Dichte (in diesem Fall Buche) wiesen um bis zu 30 % geringere Biegefestigkeiten auf als solche aus Kiefer bei gleicher Plattenrohddichte von $0,60 \text{ g/cm}^3$. Äquivalente Biegefestigkeitswerte werden durch eine Erhöhung der Plattenrohddichte auf $0,70 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Optimalste Werte ergaben sich bei einer dreischichtigen Platte mit Decklagen aus Kiefer und einer Mittelschicht aus Buche bei einer Plattenrohddichte um $0,65 \text{ g/cm}^3$. Als ausserordentlich positiv dagegen erwies sich die Ausbeute an Buchenspanmasse je Schichtfestmeter aufgrund der höheren Rohddichte des Holzes. Selbst bei einer Plattenrohddichte von $0,70 \text{ g/cm}^3$ werden bis zu 15 % an Buchenholz gespart, um Spanplatten herzustellen.

Erle: Auch Klauditz (1952) führte Untersuchungen zur Verwendung von Erlenholz in Spanplatten durch und kam zu dem Ergebnis, dass es gut geeignet ist. Zur damaligen Zeit wurde Erlenholz in der deutschen Bundesrepublik und in anderen europäischen Ländern in grösserem Umfang für die Spanplattenproduktion herangezogen. Für die Schweiz wurde 1961 ein Anteil an Erle von 8 % angegeben (Hoppeler 1961). Der Grund für weitere Untersuchungen von Kehr war ein unzureichendes Wissen über den Einfluss des Zusatzes auf die Abhebefestigkeit und Dickenquellung. Die Resultate bestätigten jedoch die Aussage von Klauditz (1952). Die gute Zerspanbarkeit des Erlenholzes sowie die grosse Gleichmässigkeit der Späne ermöglichen eine Nutzung für Deck- und Mittelschichten. Die Biegefestigkeit im

Rohdichtebereich zwischen 0,30 bis 0,70 g/cm³ und die Dickenquellung der Spanplatten mit Mittelschichten aus Erle ist vergleichbar mit Platten aus Kiefernholz, die Abhebefestigkeit sogar höher (Kehr 1962b).

Inwieweit sich eine derzeitige Nutzung von Erlenholz für Spanplatten lohnt, ist fraglich. Dem aktuellen Landesforstinventar von 2004/06 sind keine detaillierten Daten zum Bestand zu entnehmen, so dass von einem kleinen Erlenvorrat ausgegangen werden muss. Grund dafür sind u.a. die Standortansprüche der Erle. Sie gedeiht am besten auf dauernd nassem Boden mit ausreichender Basenversorgung. Solche Standorte sind in der Schweiz kaum zu finden.

Birke: In der Schweiz spielt die Birke als Nutzholz eine untergeordnete Rolle. Anders sieht es in Russland und Skandinavien aus, wo ganze Birkenwälder mit vor allem guten und geraden Schaftformen vorkommen. In diesen Ländern wird das Holz in grossem Umfang für Spanplatten eingesetzt. Den Untersuchungen von Kehr und Schilling (1965a) zufolge weisen Birkenspanplatten im Rohdichtebereich von 0,50 bis 0,70 g/cm³ geringere Biege- und Abhebefestigungen sowie eine deutlich höhere Dickenquellung als Kiefernspanplatten auf. Die besten Werte, d.h. keine Minderung der Platteneigenschaften, wurden mit dreischichtigen Platten, deren Mittelschicht aus Kiefernspänen und 25 % Birkenspänen bestand, erzielt.

Eiche: Die Eiche ist mit einem aktuellen Vorrat von 9,10 Mio. m³ (Brändli 2010) die viert häufigste Baumart der Schweiz. Sie wird derzeit zu gewissen Anteilen für die Herstellung von Spanplatten eingesetzt. Reine Eichenspanplatten wären aufgrund des höheren Einkaufspreises unwirtschaftlich. Zu grosse Mengen eignen sich zudem nicht, da die Eiche aufgrund ihres hohen Gerbstoffgehaltes Verfärbungen in der Platte verursachen kann und damit die Qualität mindern. Im Gemisch mit anderen Holzarten eignet sich die Eiche jedoch hervorragend für die Mittelschicht von Spanplatten. Das zeigen auch die Untersuchungen von Kehr und Schilling (1965b). Spanplatten aus 25 bis 100 % Eiche in der Mittelschicht ergaben im Gegensatz zu Mittelschichten aus 100 % Kiefernspänen ähnliche Rohdichte-, Biegefestigkeits- und Abhebefestigkeitswerte. Als besonders positiv erweist sich der Einfluss auf die Dickenquellung, die mit steigendem Eichenanteil um bis zu 4 % sank.

Weiterhin untersuchte Grigoriou (1981) den Einfluss u.a. von Rotbuche, Eiche, Pappel und Hainbuche auf die Deckschichten dreischichtiger 20 mm starker Spanplatten mit einem Kern aus Rotbuche. Neben Querkzug-, Biege- und Abhebefestigkeit prüfte er das Verhalten gegenüber Feuchte sowie die Rauheit der Spanplattenoberfläche. Seinen Ergebnissen ist zu entnehmen, dass Spanplatten mit einer Deckschicht aus Rotbuche zwar die niedrigsten Biegefestigkeiten unter den ausgewählten Laubhölzern, jedoch die grössten Querkzugfestigkeits- und dritthöchsten Abhebefestigkeitswerte erzielten. Die beste Abhebefestigkeit erlangten Spanplatten mit Deckschichten aus Eiche. Zudem wirkte sich deren hoher Gerbstoffgehalt besonders positiv auf die Dickenzunahme bei Feuchteaufnahme aus. Auffällig ist, dass die ermittelten Werte in beinahe allen Klassen den heutigen Anforderungen einer Spanplatte nach DIN EN 312 (2009) gerecht werden würden. In der folgenden Tabelle sind Querkzug- und Biegefestigkeiten sowie Dickenquellung aus der Veröffentlichung von Grigoriou (1981) den Forderungen der DIN EN 312 (2009) gegenübergestellt.

Tab. 3-7: Werte für Querzug- und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung (DIN EN 312 2009; Grigoriou 1981)

Eigenschaft	DIN EN 312 P1 – P7 (Dickenbereich 13 – 20 mm)	Werte nach Grigoriou (Plattendicke 20 mm)							
		Rotbuche		Eiche		Pappel		Hainbuche	
		Deckschichtanteil [%]							
		35	50	35	50	35	50	35	50
Biegefestigkeit [N/mm ²]	10 - 20	25,48	26,42	27,54	28,65	27,13	28,14	28,08	29,49
Querzugfestigkeit [N/mm ²]	0,24 – 0,70	0,61	0,58	0,52	0,49	0,50		0,59	0,57
Abhebefestigkeit [N/mm ²]	0,80 (Angabe nur für P2)	1,57	1,53	1,65	1,65	1,23	1,27	1,58	1,57
Dickenquellung [%]	10 - 15	12,20	9,88	9,06	6,44	11,56	8,23	13,63	9,98

P1 – P7= Klassen der Plattentypen, wobei

P1: Platten für allgemeine Zwecke im Trockenbereich

P2: Platten für Inneneinrichtungen (einschliesslich Möbel) zur Verwendung im Trockenbereich

P3: Platten für nicht tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich

P4: Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Trockenbereich

P5: Platten für tragende Zwecke zur Verwendung im Feuchtbereich

P6: hoch belastbare Platten für tragende Zwecke im Trockenbereich

P7: hoch belastbare Platten für tragende Zwecke im Feuchtbereich

Anzumerken ist, dass nur in der Klasse P7 eine Querzugfestigkeit von 0,70 N/mm² verlangt wird, die restlichen Klassen fordern lediglich Werte bis 0,50 N/mm².

Auch neuere Studien zeugen vom Interesse Substitutrohstoffe für sonst üblichen Holzarten Kiefer und Fichte zu finden. Vos und Kharazipour (2008) stellten dreischichtige Sandwichplatten aus Buchenspäne in der Mittelschicht und Küstentanne in den zwei Deckschichten her und führten Prüfungen zur Biege-, Abhebe- und Zugfestigkeit sowie Dickenquellung durch, dessen Ergebnisse mit Referenzplatten der Firma Pfeleiderer Holzwerkstoffe GmbH & CO. KG bestehend aus einem industriellen Spangemisch verglichen wurden. Die Werte aller drei untersuchten Festigkeiten lagen deutlich über denen der Referenzen und erfüllten bereits ab einer Plattenrohichte von 600 kg/ m³ die Anforderungen für tragende Zwecke im Trockenbereich. Die Quellungswerte der Sandwichplatten waren innerhalb von zwei Stunden höher, nach 24 Stunden jedoch niedriger als die Referenzmaterialien. Diese Untersuchung verdeutlicht damit, dass sich trotz der relativ hohen Rohichte des Buchenholzes, leichte Platten mit einer hohen Dimensionsstabilität fertigen lassen.

2. Mineralgebundene Spanplatten

Grundsätzliches: Die Anfänge mineralgebundener Spanplatten sind auf den französischen Physiker Stanislas Sorel zurückzuführen. Er entwickelte 1867 das sogenannte Steinholz (auch Xylolith genannt), ein fugenloser Bodenbelag aus Magnesiaement und Holzspänen, der eine hohe Wärmekapazität und gute Schalldämmung aufwies. Im Anschluss folgten 1926 mineralgebundene Holzwolle-Leichtbauplatten. Beide besitzen eine hohe Wärmekapazität und Fähigkeit, Schall sehr gut zu dämmen. Neben der Holzwolle wurden ab 1930 auch Holzspäne für die Fertigung zementgebundener Formkörper unter dem Namen „Durisol“ verwendet. Diese Materialien sind schwerer als HWL-Platten und zeichnen sich durch gute Wärmedämmwerte aus. „Durisolplatten“ folgten 1973 und sind als erste zementgebundener Spanplatte ein Produkt einer Schweizer Firma mit dem Namen „Durisol“, die auch heute noch Dach- und Deckenplatten aus Holzfaserbeton herstellt. Zusätzlich zu Magnesit und Zement

dient heutzutage auch Gips als Komponente. Der Holzanteil der Platten liegt bei ca. 20 – 25 %, das Bindemittel ist mit 60 - 65 % vorhanden, den Rest bilden Zusatzstoffe und Wasser. Wie bei den klassischen Spanplatten wird auch hier überwiegend Restholz eingesetzt. Zementgebundene Spanplatten besitzen ein gutes Brandverhalten und sind feuchte- und pilzresistent. Ihre Einsatzgebiete sind Bekleidungen für Wände, Decken und Böden. Mit Magnesit gebundene Spanplatten sind zwar empfindlicher gegenüber Feuchte, zeichnen sich jedoch durch eine gute feuerhemmende Wirkung aus, was ihre Anwendung im Schiffs- sowie Holzhaus-Innenausbau erklärt.

Forschung: Nach einem Überblick über durchgeführte Untersuchungen (Tab. 3-8) von mineralgebundenen Spanplatten werden diese näher beschrieben.

Tab. 3-8: Übersicht über Untersuchungen von mineralgebundenen Spanplatten (Sandermann und Dehn 1951; Sandermann et al. 1960; Sandermann und Kohler 1964; Simatupang 1975; Schwarz und Simatupang 1984; Schubert et al. 1990; Alpár und Rácz 2007; Urbonas et al. 2009)

Untersuchungen			
Autor(-en)	Jahr	Hintergrund/Aufbau	Ergebnis
Sandermann W.; Dehn v. U.	1951	Einfluss der chemischen Faktoren des Holzes auf die Festigkeit	- chemische Faktoren, bes. wasserlöslichen Extraktstoffe, haben Einfluss → Fichte und Pappel gut geeignet → Buche und Eiche nicht geeignet
Sandermann W. et al.	1960	Untersuchung des Abbindevorgangs an zementgebundenen Platten	- Hinderung des Abbindevorgangs durch die Umschliessung der Zementpartikel durch Calciumsalze, welche die Glucose in Calciumhydratlösung bildet
Sandermann W.; Kohler R.	1964	Entwicklung eines Schnelltestes	- Darstellung der Tauglichkeit von 99 Hölzern
Simatupang M.H.	1975	Untersuchung des Abbindevorgangs an zementgebundenen Platten	- zusätzliche Hinderung des Abbindevorgangs durch teilweisen chemischen Abbau der Zellwand
Schwarz H.G.; Simatupang M.H.	1984	Eignung des Buchenholzes durch Untersuchung der Ursache der Enthärtungsstörung und die Eignung möglicher Vorbehandlungen	- ungeeignet: Dämpfen - teilweise geeignet: Lagerung des Holzes, Natronlaugeextraktion - gut geeignet: Wasserextraktion
Schubert B. et al.	1991	Einfluss von Abbindeiegeln bei der Verwendung von Laubholz	- Magnesiumchlorid ist als Abbindeiegler geeignet
Alpár T.; Rácz I.	2007	Wege der Kostensenkung zementgebundener Spanplatten (in Bezug Additiv + Holzart)	- das teure Additiv Wasserglas kann durch eine Lösung aus Calciumchlorid und Calciumformiat ersetzt werden - mit Pappel günstigere und den Anforderungen entsprechende Platten herstellbar
Urbonas L. et al.	2009	Untersuchungen an Holzleichtbeton mit Holzspänen aus Buche sowie Fichte/ Tanne	- schnelles Erstarren und Erhärten des Materials durch die Zugabe von Dodekacalciumheptaaluminatfluorid

Für mineralgebundene Spanplatten werden im Moment wie bei der klassischen Variante überwiegend Nadelhölzer verwendet. Jedoch befinden sich auch hier unter den einsetzbaren Holzarten Laubhölzer. Über die Verfahrenstechnik-Industrie von HWL-Platten berichteten bereits Vorreiter (1943). Seinem Handbuch für Holzabfallwirtschaft ist zu entnehmen, dass das Holz von Fichte, Tanne und Kiefer, aber auch von Buche, Aspe, Linde und weiteren weichen Laubhölzern stammen kann.

Diese Aussage war allerdings nur eingeschränkt gültig. Man stellte schnell fest, dass zwischen den Holzarten durchaus Unterschiede bezüglich ihrer Eignung vorlagen. Die Fichte erwies

sich als geeignet, Kiefer, Buche und Eiche dagegen nicht. Um diesem Problem auf den Grund zu gehen, führten Sandermann und Dehn (1951) Untersuchungen zum Einfluss chemischer Faktoren auf die Festigkeitseigenschaften zementgebundener Holzwolleplatten durch. Die Annahme, das Verhalten hänge vom Harzgehalt ab, erwies sich als falsch. Vielmehr sind es die wasserlöslichen Extraktstoffe des Holzes wie Zucker, höhere Kohlenhydrate, Gerbstoffe und Phenolverbindungen des Lignins, die die Kristallisation der Hydratationsprodukte des Zementes verzögern. Daher führten Fichte und Pappel zu guten Ergebnissen, Buche und Eiche dagegen nicht. Weitere Studien an Zement haben gezeigt, dass bereits Zusätze von 0,25 % Glucose, Saccharose und Xylose, bezogen auf das Zementgewicht, zu vollkommen unbrauchbaren Platten führen. Zusätzlich besitzen die Inhaltsstoffe Tannin und Conindentrin eine abbindeverzögernde Wirkung (Sandermann und Brendel 1956). Sandermann et al. (1960) vermuteten anschliessend, dass sich durch die Inhaltsstoffe eine Schutzhaut um die Zementpartikel legt und somit der nötige Zutritt des Wassers zur Abbindung verhindert wird. Zur Abklärung dieses Zusammenhangs wendete er drei methodische Herangehensweisen an, die seine These allesamt bestätigten. Es zeigte sich, dass Glucose in gesättigter Calciumhydratlösung unlösliche Calciumsalze bildet, die die Oberfläche des Zementpartikels umschliessen. Nach Untersuchungen von Simatupang (1975) findet zudem ein teilweiser chemischer Abbau der Zellwand (besonders der Hemicellulose) statt, der wiederum Bruchstücke freisetzt, die die Abbindung des Zementes stören.

Mit einem eigens entwickelten Schnelltest, war es Sandermann und Kohler (1964) möglich, 99 Hölzer auf ihre Tauglichkeit für zementgebundene Werkstoffe zu untersuchen. Der übersichtlichen Ergebnisdarstellung in Tabellenform ist zu entnehmen, dass unter den einheimischen Laubholzarten Pappel und Edelkastanie als geeignet, Eiche als bedingt und Buche, Ahorn, Erle sowie Birke als nicht geeignet gelten.

Die Erkenntnisse über die Wirkung des Holzes auf den Zement erforderten Lösungen zur Kompatibilität von Zement und Holz. Eine Möglichkeit bestand in der Zugabe von Additiven, die den Alkaliangriff verhindern. Weiterhin erfolgte eine Beschleunigung des Abbindevorganges, bevor es zu einer Diffusion der schädigenden Inhaltstoffe des Holzes in der ersten Erhärtungsphase des Zementes kommen konnte.

Da die Buche in vielen europäischen Ländern schon immer eine der am meist vorkommenden Laubholzarten war, befassten sich schliesslich Schwarz und Simatupang (1984) eingehender mit der Ursache der Erhärtungsstörung und der Eignung möglicher Vorbehandlungen. Untersucht wurde hierbei der Einfluss der Lagerung, des Dämpfens sowie der Wasser- und Natronlaugenextraktion. Die Lagerungsversuche ergaben eine Abnahme an löslichen Zuckern von ursprünglich 0,4 % auf 0,1 %, wobei die im Freien gelagerten Proben bessere Ergebnisse brachten. Dass dieses Herauslösen schon Einfluss auf die Aushärtung hat, zeigte die Messung der Hydratationstemperatur, die mit sinkendem Zuckergehalt zunahm. Als ungeeignetes Mittel erwies sich dagegen das Dämpfen der Buche. Die Abnahme an niedermolekularen Zuckern war zu gering für einen spürbaren Effekt. Zudem werden Komponenten der Zellwand abgebaut, deren Bruchstücke ebenfalls die Aushärtung hemmen. Zwischen den zwei Extraktionsvarianten war die mit Wasser die einfachere Methode mit den besseren Ergebnissen. Die schädlichen Inhaltsstoffe konnten so weit entfernt werden, dass im Anschluss Platten mit ausreichenden Festigkeiten hergestellt werden konnten. Durch den Einsatz alkaliarmer Zemente kann der Abbau der Hemicellulosen besonders bei schwach inhibitorisch wirkendem Holz wie Nadelholz erheblich reduziert werden. Bei stark inhibitorisch wirkendem Holz wie Laubholz sollten aufgrund der stärkeren Abbaubarkeit der Hemicellulosen zusätzlich Abbinderegler eingesetzt werden. Dabei erwies sich Magnesiumchlorid in entsprechend auf die Höhe der Inhibitoren abgestimmter Konzentration als geeignetes Mittel (Schubert et al. 1990).

Die bisher genannten Lösungen sind allerdings meistens mit Mehrkosten, einer komplizierten Herstellung oder Nachteilen für das Endprodukt verbunden. Als effektivere und günstigere Variante erweist sich nach neuesten Untersuchungen an Holzleichtbeton mit Holzspänen aus Buche sowie Fichte/Tanne die Verwendung von Dodekacalciumheptaaluminatfluorid. Während der Hydratation des Zementes kommt es zur vermehrten Bildung des Minerals Ettringit, das zum schnellen Erstarren und Erhärten des Materials führt (Urbonas et al. 2009). Mit dieser Methode wären letztendlich auch Laubhölzer geeignete Materialkomponenten. Auch Alpár und Rácz (2007) verfolgten die Intention der Kostensenkung zementgebundener Spanplatten. Sie untersuchten dafür zum einen die Möglichkeit der Verwendung einer Lösung aus Calciumchlorid und Calciumformiat als Ersatz des bisherigen Additivs Wasserglas zur schnellen Abbindung des Zementes. Zum anderen verwendeten sie Pappel als alleinige Holzkomponente oder in Kombination mit Kiefer. Beide Methoden brachten positive Ergebnisse. Das neue Additiv erhöhte bei fast allen Varianten die mechanischen Eigenschaften. Obwohl die Festigkeiten von Pappel unter denen von Kiefer liegen, entstanden Platten mit zum Teil höheren Festigkeitswerten. Als besonders geeignet erwiesen sich die Kombinationen Kiefer/Pappel von 40/60 bzw. 20/80. Die Festigkeiten zementgebundener Platten nur aus Pappel waren etwas niedriger, jedoch noch in Bereichen derer aus Kiefer. Gründe für die gute Tauglichkeit sind in den Inhaltstoffen und der Form der Späne zu sehen. Pappel besitzt wenige abbinde hemmende Substanzen sowie lange, wellige Späne, die sich besser verketten.

3. OSB (Oriented Strand Board)

Grundsätzliches: Nach DIN EN 300 (2006) sind OSB aus langen, flachen Holzspänen (Strands) und mit einem Bindemittel gefertigte Mehrschichtplatten (Abb. 3-30). Die Ausrichtung der Strands der Aussenschichten ist parallel zur Plattenebene oder –breite, wohingegen die Strands der Mittelschicht zufällig oder rechtwinklig zu den Strands der Aussenschichten angeordnet sind. Die Grösse eines Strands nach heutigem Standard beträgt 50 mm in der Länge und bis zu 2 mm in der Dicke. Die Klassifizierung erfolgt in vier Plattentypen von Platten für nicht tragende Zwecke im Trockenbereich bis hin zu hochbelastbaren Platten für tragende Zwecke im Feuchtbereich.



Abb. 3-30: Oberfläche einer OSB (Verena Krackler)

Der Ursprung der OSB Platte geht eigentlich auf Untersuchungen an zementgebundenen Faserplatten im Jahre 1946 zurück. Armin Elmendorf setzte damals bei Entwicklungsarbeiten in Palo Alto, Kalifornien, USA gerichtete Späne ein. Einige Zeit später führten auch Klauditz et al. (1960) Untersuchungen zur Spanorientierung durch. In einem Patent nennt Elmendorf (1965) seine mineralgebundenen Spanplatten bereits „Oriented Strand Board“ und wie aus der Bezeichnung ersichtlich wird, die Späne „Strands“. Elmendorf (1969) entwickelte zudem eine maschinelle Methode zur parallelen Ausrichtung der Späne. Zur industriellen Produktion und

verfahrenstechnischen Weiterentwicklung kam es allerdings erst um 1975 in Nordamerika. In Europa startete die OSB-Fertigung schliesslich in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts. Nordamerika verwendet als Rohstoff für die Fertigung hauptsächlich Pappel, europäische Hersteller setzen wie bei der klassischen Spanplatte überwiegend Kiefer ein.

Forschung: In Tab. 3-9 sind Untersuchungen aufgeführt, die sich mit der Verwendung von Laubhölzern für OSB beschäftigten. Eine genauere Beschreibung derer erfolgt wieder im Anschluss.

Tab. 3-9: Übersicht über OSB (Klauditz et al. 1960; Walter et al. 1979; Thole 2008)

Untersuchungen			
Autor(-en)	Jahr	Hintergrund/ Aufbau	Ergebnis
Klauditz W. et al.	1960	Eignung von Holzspanwerkstoffen mit gerichteter Festigkeiten	- niedrigere Holzrohndichten führen zu hohen Festigkeiten
Walter K. et al.	1979	Einfluss der Spanform	- hohe Biegefestigkeiten durch dünne Späne und hohe Plattenrohndichten - Hölzer mit gleichmässiger Struktur wie Erle, Weide, Bergahorn besonders gut geeignet
Thole V.	2008	Eignung von Buche für OSB	- Anforderung in Biege- und Querkzugfestigkeit entsprechen dem Plattentyp 3 für tragende Zwecke im Feuchtbereich

Bereits ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden in Europa Untersuchungen zur Orientierung der Späne in Spanplatten durchgeführt, da erkannt wurde, dass die Ausrichtung und die Abmessungen der Holzpartikel die mechanischen Eigenschaften erheblich beeinflussen. Mit der klassischen Spanplatte wird durch das Verpressen unterschiedlich grosser Späne mit einem Bindemittel ein annähernd isotroper Werkstoff erzeugt, dessen Quell- und Schwindverhalten in der Plattenebene nahezu gleich ist, der jedoch geringere Festigkeiten als Vollholz aufweist. Bei der OSB dagegen wird die Festigkeitsanisotropie des Holzes durch die gerichtete, überlappende Verleimung dünnflächiger, langer und faserparallel geschnittener Späne genutzt. Damit entsteht ein Werkstoff, der in der bevorzugten Richtung der Späne die Festigkeitswerte besonders die Biegefestigkeit einer Spanplatte weit übertrifft. Über einzelne Parameter kann zudem Einfluss auf die Festigkeit genommen werden. Klauditz et al. (1960) zeigten, dass durch unterschiedliche Rohdichten des Holzes die Biegefestigkeit gesenkt bzw. erhöht werden kann. Dabei ergab sich, dass vor allem niedrigere Rohdichten zu hohen Biegefestigkeiten führen. Auch die Spandicke und die Plattenrohndichte beeinflussen massgeblich die Biegefestigkeit. Dünnere Späne sowie grössere Plattenrohndichten bewirken deutlich höhere Werte. Nach Untersuchungen von Walter et al. (1979) stieg die Biegefestigkeit zwischen 0,58 mm und 0,25 mm dicken Spänen bei einer Plattenrohndichte von 650 kg/m³ um 36 % und bei 750 kg/m³ nochmals um 24 % an. Auch die Holzart spielt bezüglich der Spanqualität eine entscheidende Rolle. Am besten eignen sich Hölzer mit gleichmässiger Struktur wie z.B. Zitterpappel, Weide, Erle, Bergahorn und Fichte. Grobporige Hölzer sowie Hölzer mit grossen Rohdichteunterschieden zwischen Früh- und Spätholz wie Kiefer neigen zum Zerfallen nach der Zerspannung (Brinkmann 1979). Trotzdem dominiert die Kiefer derzeit als Rohstoff. Da diese Holzart jedoch auch von einem sinkenden Vorrat betroffen ist, ist man seit einiger Zeit bemüht Lösungen aus geringwertigem Küstentannen- und auch Buchenholz zu entwickeln. Nach Thole (2008) sind OSB der Klasse 4 aus Küstentanne ohne weiteres möglich. Die OSB aus Buche entsprach immerhin den Anforderung in Biege- und Querkzugfestigkeit dem Plattentyp 3 für tragende Zwecke im Feuchtbereich. Der Grund für die ungleichen Qualitäten ist auf die unterschiedlichen Rohdichten beider Holzarten zurückzuführen. Aufgrund einer geringeren Rohdichte der

Küstentanne von 430 kg/m^3 verlangt eine OSB der gleichen Plattenrohichte mehr Strands als eine OSB aus Buche mit 720 kg/m^3 . Weniger Strands bedeuten dagegen einen größeren zwischenpartikulären Porenraum, der wiederum die Rohdichteverteilung, die verklebte Strandfläche und das Bruchverhalten beeinflusst. Weiterhin weist Thole darauf hin, dass für bessere Qualitäten und eine effektive Nutzung geringwertiger Sortimente von Buche für die Herstellung von OSB eine Anpassung der derzeitigen Zerspanungstechnik nötig sein wird.

4. LSL (Laminated Strand Lumber, Spanstreifenholz)

Hinter dieser Bezeichnung verbirgt sich ein Spezialprodukt von OSB aus flachen extrem langen Holzspänen (ca. 300 mm). Je nach Ausrichtung der Späne lassen sich sowohl platten- als auch stabförmige Ausführungen realisieren. Bei stabförmigen Elementen wie Schwellen oder Deckenträger sind die Späne ausschliesslich in Plattenlängsrichtung angeordnet. Für die Verwendung als Plattenwerkstoff wird ein Teil der Späne quer zur Plattenrichtung ausgerichtet, womit die mechanischen Eigenschaften in Längs- und Querrichtung etwas angeglichen werden.

5. OSL (Oriented Strand Lumber)

OSL setzt sich aus flachen, ähnlich dem OSB langen Holzspänen zusammen, weist jedoch keine quergerichteten Späne und damit keine Mittelschicht auf. Damit lassen sich nicht nur platten-, sondern auch stabförmige Ausführungen wie Balken realisieren, da die Späne in grösseren Dicken verklebt werden können. Wie der Name Constructive Strand Lumber schon verrät kann der Werkstoff im tragenden Bereich (Dächer, Fussböden, Wände), für statische Elemente (z.B. im Verpackungsbereich) oder höher belastete Böden im Bau und Fahrzeugbau sowie im Gerüstbau eingesetzt werden. Bestehend aus Laubholz würde OSL genauso wie LSL eine kostengünstige Variante für Anwendungen im Holzbau bedeuten, der sich ohne grosse Schwierigkeiten industriell herstellen liesse.

3.2.4 Faserwerkstoffe

Dieser Kategorie werden alle aus Holzfasern bestehenden Werkstoffe zugeordnet. Darunter fallen die unterschiedlichen Varianten der Holzfaserplatten, Wärmedämmstoffe sowie Holzfaserformteile. Zur Herstellung werden ausschliesslich Industrieböden, Schwachholz aus Durchforstungen und Restholz aus der Schnittholzproduktion eingesetzt. Für die Aufbereitung der Fasern wird das gelieferte Holz zerkleinert, die Grobanteile mittels Sieben, die Eisenanteile mittels Magnetabscheidern entfernt und die Hackschnitzel gewaschen. Durch das anschliessende Dämpfen bei ca. 180°C wird das Lignin plastifiziert, wodurch das Zerfaserungsaggregat die Hackschnitzel genau in den Bereichen zu Fasern trennt, wo die höchste Ligninkonzentration vorliegt; an der Mittellamelle. Die Faser bleibt damit weitgehend unbeschädigt.

1. Faserplatten

Grundsätzliches: Mit 534.000 m^3 wiesen Faserplatten im Jahre 2007 in der Schweiz nach den Spanplatten die zweithöchste Produktionsmenge unter den Holzwerkstoffen auf. Nach der DIN EN 316 (2009) sind Holzfaserplatten (oder kurz auch Faserplatten) plattenförmige Werkstoffe mit einer Nenndicke von 1,5 mm und grösser, die unter Anwendung von Druck und/ oder Hitze aus Lignocellulosefasern hergestellt werden. Verwendungsgebiete sind u.a im Karosserie-, Möbel- und Innenausbau zu finden. Für die Schall- und Wärmedämmung werden poröse Faserplatten eingesetzt. Die Bindung der Fasern wird entweder über deren Verfilzung

aufgrund eigener Verklebungseigenschaften oder durch die Zugabe eines synthetischen Bindemittels erzielt. Es existieren drei verschiedene Herstellungsverfahren – das Nass-, das Trocken- und das Halbtrockenverfahren. Das Trockenverfahren beruht im Wesentlichen auf der Herstellung unter Druck und Hitze unter Zugabe eines synthetischen Bindemittels, wohingegen beim Nassverfahren die Bindung über Wasserstoffbrücken und van-der-Waals-Kräfte erfolgt. Das Halbtrockenverfahren ist eine Kombination aus beiden. Aufgrund höherer Produktionskosten durch die Abwasseraufbereitung sowie einer stärkeren Umweltbelastung, wird das Nassverfahren heutzutage nur noch begrenzt eingesetzt. Es werden nach DIN EN 316 (2009) folgende Plattentypen unterschieden:

Platten nach dem Trockenverfahren:

- ◆ Mitteldichten Faserplatten (MDF), Hochdichte Faserplatten (HDF)

Platten nach dem Nassverfahren:

- ◆ Harte Platten (HB) mit einer Dichte $\geq 900 \text{ kg/ m}^3$
- ◆ Mittelharte Platten (MB) mit einer Dichte ≥ 400 bis $< 900 \text{ kg/ m}^3$, dazu zählen:
 - Mittelharte Platten geringer Dichte (MBL, Dichte ≥ 400 bis $< 560 \text{ kg/ m}^3$)
 - Mittelharte Platten hoher Dichte (MBH, Dichte ≥ 560 bis $< 900 \text{ kg/ m}^3$)
- ◆ Poröse Platten (SB) mit einer Dichte ≥ 230 bis $< 400 \text{ kg/ m}^3$ mit thermischen und akustischen Dämmeigenschaften

Alle Platten können noch mit zusätzlichen Eigenschaften, wie z.B. Feuerschutz, Feuchtebeständigkeit, Beständigkeit gegen biologischen Befall ausgestattet werden.

Generell lassen sich sowohl Nadel- als auch Laubholz zu Faserplatten verarbeiten. Fasern sind Holzzellen bestehend aus Zellwand und Zellumen, die sich hauptsächlich aus den chemischen Bestandteilen Cellulose, Hemicellulose und Lignin zusammensetzen. Deren Anteile sind von Holzart zu Holzart und vor allem zwischen Nadel- und Laubholz unterschiedlich. Daher sind Kenntnisse über den Aufbau und dessen Einfluss auf das Endprodukt besonders wichtig. Als massgebliche Faktoren auf die Qualität und das Verfilzungsverhalten und damit auf die Festigkeitseigenschaften einer Faserplatte nennt Lampert (1967):

1. den technisch brauchbaren Faseranteil: Dieser wirkt sich besonders auf die Ausbeute aus, kann jedoch stark zwischen verschiedenen Pflanzengattungen bzw. Nadel- und Laubholz variieren. Nadelholz hat im Durchschnitt einen Faseranteil von 91 - 95 %, Laubholz dagegen nur ca. 66 %. Die restlichen Nichtfaseranteile wie Parenchym oder Gefässe dienen zwar als Füllstoff, können sich jedoch bei zu grosser Menge ungünstig auf den technologischen Prozess und das Endprodukt auswirken.

2. die geometrischen Struktur der Zellelemente und Fasern, Oberfläche und Grösse der Fasern nach der Zerfaserung: Vliesbildungs- und Verdichtungsverhalten wird vor allem von der Länge, Dicke, Oberfläche, Zellwanddicke und Festigkeit der Fasern und dem angewendeten Verfahren bestimmt. Im Nassverfahren begünstigt eine schlanke, krümmungsfähige Faser mit einer rauen Oberfläche, wie sie Nadelhölzer meist aufweisen, die Verfilzung. Diese Verfilzung wäre im Trockenverfahren nachteilhaft, da die Fasern während der Wirbelung im Luftstrom zu schnell verhaken und somit kein gleichmässiges Vlies bilden würden, was für die Verwendung von kurzen, glatten und dünnen Fasern gleich denen von einigen Laubhölzern spricht. Die Zellwanddicke entscheidet zudem massgebend über die Enddicke einer Platte. Da dünnwandige Fasern meist grosse Porenvolumen aufweisen, lassen sie sich gut zusammendrücken und bilden breite sich überlagernde Haftflächen, was zu sehr dichten Platten führen kann. Bei dickwandigen Fasern ist diese Schichtung nicht möglich.

3. *den chemischen Aufbau*: Cellulose besteht im Wesentlichen aus einzelnen Glucosemolekülen, die über glykosidische Bindungen kettenförmig verbunden sind. Diese Anordnung macht das Holz sehr zugfest in Richtung des Faserverlaufs. Ziel bei der Faserplattenherstellung ist es, diese Cellulose-Ketten so wenig wie möglich anzugreifen, um die Zugfestigkeit zu wahren. Lignin verleiht dem Holz seine Druckfestigkeit und dient als wasserabweisender Bestandteil, in den die Cellulose eingebettet ist. Durch hydrothermische Vorgänge während des Herstellungsprozesses von Faserplatten kommt es allerdings zu Veränderungen und Spaltungen des Lignin-Cellulose-Verbandes. Dem kann durch eine schwache Hydrolyse des Lignins zu Aktivlignin entgegen gewirkt werden, was mit Furfural zu einem Harz kondensieren kann. In richtiger Menge wird die Druckfestigkeit erhöht, das Quellvermögen gemindert. Grundsätzlich steigt mit höherem Ligningehalt die Rohdichte der Platte. Die Hemicellulosen, ebenfalls Verkittungssubstanz, können je nach Kettenlänge ebenfalls verklebend wirken und damit die Festigkeit erhöhen. Besonders die Glucomannane, welche in Nadelhölzern in grösseren Mengen vorkommen als in Laubhölzern, haben diese Fähigkeit. Grundsätzlich überwiegt allerdings der negative Einfluss auf das Quell- und Schwindverhalten, da die Hemicellulosen aufgrund ihres Aufbaus stark hydrophil (=wasseranziehend) sind.

Tabelle 3-10 stellt den Anteil, die Beschaffenheit, die chemische Zusammensetzung der Fasern sowie die Rohdichte einiger wichtiger Nadel- und Laubhölzer dar. Anhand dieser Tabelle ist es möglich die Eignung einer Holzart entsprechend der technologischen Verfahren zu beurteilen.

Tab. 3-10: Anteil, Beschaffenheit und chemische Zusammensetzung der Fasern einiger wichtiger Nadel- und Laubhölzer (Autorenkollektiv 1975; Sell 1997; Lampert 1967; Wagenführ und Scheiber 1974; Trendelenburg und Mayer-Wegelin 1955)

Holzart	Rohdichte [kg/m³]	Faserart	Faseranteil [%]	Geometrische Struktur, Grösse und Oberfläche					Chemische Zusammensetzung [%]		
				Abmessungen der Fasern		Mittlere Schlankheit l/d	mittlere Zellwanddicke [µm]		Cellulose	Lignin	Hemicellulose
				Länge l [mm]	Durchmesser d [µm]		Frühholz	Spätholz			
Fichte	430...470	Tracheiden	93 - 95	1,30...2,80...4,30	21...31...40	90	1,75	5,35	durchschnittlich		
Kiefer	460...510		91 - 95	1,80...3,10...4,50	14...35...46	89	3,35	6,50	43	30	20
Tanne	430...480		91 - 94	3,40...4,30...4,60	18...38...58	115	1,85	4,50			
Charakterisierung	- geringe Rohdichte → geringe Raumdichte → höherer Holzverbrauch → geringere Ausbeute	hoher nutzbarer Faseranteil → gute Ausbeute		- lange, schlanke, krümmungsfähige Fasern → schnelles Verfilzen → geeignet für Nassverfahren - Frühholzfaser: dünnwandig, weillumig → schlank, zusammendrückbar → gute Verdichtung, Ausbild. vieler platter Haft- und Klebeflächen - Späthholzfaser: dickwandig, englumig → schlecht zusammendrückbar → schlechtere Verdichtung					- hoher Ligninanteil → gute Druckfestigkeit, geringeres Quellen - geringer Hemicelluloseanteil → geringeres Quellen und weniger Verklebungseffekt		
	- hohe Rohdichte → hohe Raumdichte → geringerer Holzverbrauch → höhere Ausbeute	Geringerer nutzbarer Faseranteil → geringere Ausbeute		- überwiegend kurze, dünne, glatte Fasern → geringeres Verfilzen → geeignet für Trockenverfahren - variierende Zellwanddicken innerhalb einer Holzart aufgrund differenzierteren Aufbaus					- geringer Ligninanteil → geringere Druckfestigkeiten, höheres Quellen - hoher Hemicelluloseanteil → höheres Quellen, Verklebungseffekt		
Rotbuche	700...790	Libriformfasern und Fasertracheiden	37	0,60...1,30	16...22	50	1,80...3,75...5,15		durchschnittlich		
Birke	610...680		65	0,34...1,60...1,70	14...40	59	2,10...2,65...3,35				
Eiche	650...760		58	0,28...0,88...1,60	10...30	44	1,95...2,10...2,65		43	20	30
Pappel	400...450		59	0,30...1,30...2,10	20...44	41	2,40...3,45...4,75				

Forschung: Lampert (1967) berichtet, dass aufgrund einer intensiven Nutzung des Nadelholzes und eines damit einhergehenden Holz Mangels schon Mitte des 20. Jhd. Laubholz für Faserplatten eingesetzt wurde. Diese erzielten hinsichtlich ihrer Eigenschaften gute Ergebnisse und wurden daher nach und nach verstärkt genutzt. Wie bereits erwähnt eignen sich Laubholzfasern besser für das Trockenverfahren. Vorteil dieses Verfahrens ist zudem die Möglichkeit mehrschichtige Platten herstellen zu können, wobei die einzelnen Schichten aus verschiedenen Holzarten bestehen können (Autorenkollektiv 1975). Überwiegend wurden jedoch für beide Verfahren Gemische aus Nadel- und Laubholz eingesetzt, da dies am wirtschaftlichsten war.

Mittlerweile hat sich die Produktion wieder zuungunsten von Laubholz verlagert. Faserplatten werden zum grössten Teil aus Nadelholz hergestellt. Zur Resteverwertung würden sich Laubhölzer für Faserplatten jedoch ideal anbieten, da als Rohstoffe Waldindustrie-, Durchforstungs-, Schwach- und Industrieholz verarbeitet werden können. Das würde auch der angestrebten Kaskadennutzung entsprechen, da diese Laubholzsortimente im Moment vornehmlich energetisch genutzt werden. Entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung ist die Anpassung technologischer Parameter resultierend aus der abweichenden Anatomie und chemischen Zusammensetzung der Laubhölzer. Die kürzeren Fasern erfordern eine Anpassung der Presstechnologie, da die höhere Schüttdichte der Faservliese zu einem anderen Verdichtungs- und Entgasungsverhalten führt. Weiterhin verändern bereits kleine Laubholzanteile den pH-Wert und somit die Pufferkapazität des Faserstoffes, wodurch teilweise die Aushärtung des Bindemittels unerwünscht beschleunigt bzw. verzögert wird (Buchholzer 1995). Kehr (1995) untersuchte die Eignung von Pappelholz und Baumweide für die Herstellung von MDF. In seine Untersuchungen bezog Kehr verschiedene Pappelarten verschiedener Herkunft und unterschiedlichen Alters ein. Als Klebstoff diente der industriell übliche Harnstoff-Formaldehyd (UF)- Harz. Insgesamt erreichten die Faserplatten gute Eigenschaften, besonders eignet sich Pappel für die Herstellung von MDF mit reduzierter Rohdichte im Bereich von 650 bis 700 kg/m³. Mit Graupappel liessen sich UF-Hargebundene MDF-Platten herstellen, deren Dickenquellungswert nach 24 Stunden unter 8 % und damit im Normbereich war. Diese positiven Ergebnisse konnten in Folgeuntersuchungen bestätigt werden. Reine MDF-Platten aus Pappel erreichten die für HDF und MDF notwendigen Festigkeiten und wiesen sehr niedrige Werte für die Dickenquellung auf, welche sogar niedriger waren, als die Referenzen aus Kiefer (Knust et al. 2008).

Krug und Mäbert (2007) untersuchten MDF und HDF aus Pappel, Buche, Eiche und Birke bestehend zu 100 % aus Laubholz oder zu 50 % mit Kiefer gemischt. An den Platten erfolgte die Bestimmung der physikalischen, hygrischen und chemischen Eigenschaften, deren Ergebnisse im Folgenden tabellarisch aufgeführt werden (Tab. 3-11). In der Zeile Anmerkung kann abgelesen werden, inwieweit die Werte den Anforderungen nach DIN EN 622-5 (2010) entsprechen.

Tab. 3-11: Faserstoff- und Platteneigenschaften von HDF und MDF aus Kiefer, Buche, Eiche, Pappel und Birke nach Untersuchungen von Krug und Mäbert (2007) mit steigenden Werten von links nach rechts

Eigenschaft							
Faserstoff	Faserlänge [mm], ohne Werte	Buche	Eiche	Kiefer	Pappel	Birke	
	Schüttdichte [kg/m ³]	Kiefer 17	Birke 20	Pappel 22	Eiche 40	Buche 45	
	Anmerkung	Angleichen der Faserlängen und Schüttdichten durch vorheriges Mischen der Laubholzhackschnitzel mit Hackschnitzel aus Kiefer					
	pH-Wert []	Eiche 3,6	Buche 3,7	Birke 3,9	Kiefer 4,0	Pappel 4,9	
Platte	Rohdichte [kg/m ³]	MDF	Eiche 720	Pappel 730	Birke 735	Buche 740	Kiefer 745
		HDF	Eiche 860	Pappel 865	Kiefer 865	Buche 895	Birke 910
	Dickenquellung [%], ohne Werte	MDF	Pappel	Eiche	Kiefer	Birke	Buche
		HDF	Pappel	Kiefer	Eiche	Birke	Buche
	Anmerkung	alle Werte entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, MDF aus Pappel, Eiche, Kiefer, Birke sowie alle HDF-Varianten auch Typ MDF.H* und Typ MDF.LA*					
	Querzugfestigkeit [N/mm ²], ohne Werte	MDF	Birke	Buche	Pappel	Eiche	Kiefer
		Anmerkung	alle Werte entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, MDF aus Buche, Pappel, Eiche und Kiefer auch Typ MDF.LA*, MDF aus Pappel, Eiche und Kiefer auch Typ MDF.H*				
	HDF	HDF	Pappel	Eiche	Kiefer	Birke	Buche
		Anmerkung	alle Werte entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, Typ MDF.H* und Typ MDF.LA*				
	Biegefestigkeit [N/mm ²]	MDF	Eiche 23,3	Birke 33,9	Buche 34,4	Pappel 34,5	Kiefer 40,1
Anmerkung		alle Werte, ausser MDF Eiche, entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, Typ MDF.H* und Typ MDF.LA*					
HDF		Eiche 30,9	Buche 42,0	Pappel 45,2	Birke 46,7	Buche 51,8	
Anmerkung	alle Werte entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, Typ MDF.H* und Typ MDF.LA*						
Biege-E-Modul [N/mm ²]	MDF	Eiche 2752	Pappel 3235	Birke 3535	Buche 3573	Kiefer 3680	
	HDF	Eiche 3111	Pappel 3899	Buche 3960	Birke 4258	Kiefer 4332	
	Anmerkung	alle Werte entsprechen den Normanforderungen Typ MDF*, Typ MDF.H* und Typ MDF.LA*					
Formaldehydgehalt [mg HCHO/100g atro Platte]	MDF	Eiche 11,5	Pappel 11,8	Buche 12,0	Birke 13,4	Kiefer 14,3	

Typ MDF= allgemeine Zwecke im Trockenbereich; Dickenquellung< 8%, Querzugfestigkeit≥ 0,55 N/mm², Biegefestigkeit≥ 20 N/mm², Biege-E-Modul≥ 2200 N/mm²

Typ MDF.H= allgemeine Zwecke im Feuchtbereich; Dickenquellung< 8%, Querzugfestigkeit ≥ 0,75 N/mm², Biegefestigkeit≥ 24 N/mm², Biege-E-Modul≥ 2400 N/mm²

Typ MDF.LA= tragende Zwecke im Feuchtbereich; Dickenquellung< 12%, Querzugfestigkeit ≥ 0,60 N/mm², Biegefestigkeit≥ 25 N/mm², Biege-E-Modul≥ 2500 N/mm²

Aus den Werten geht hervor, dass die Herstellung von normgerechten MDF- und HDF-Platten aus Laubhölzern möglich ist. Nicht in der Tabelle aufgeführt, aber ebenso denkbar, sind Mischungen mit Kiefernholz. Die Auswirkungen holzartenbedingter Eigenschaften wurden

dadurch kompensiert, wodurch vor allem die Biegefestigkeit und der Biege-E-Modul erhöht werden konnten.

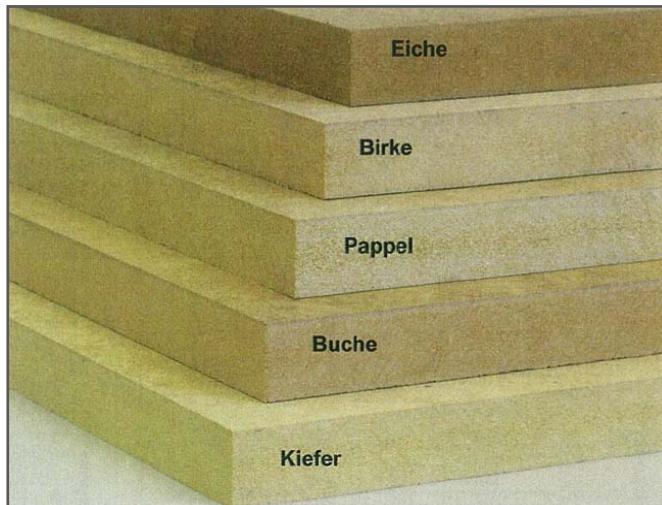


Abb. 3-31: MDF aus verschiedenen Laubholzfaserstoffen (Krug und Mäbert 2007)

2. Holzfaserdämmstoffe

Grundsätzliches: Basis der Holzfaserdämmstoffe, gelegentlich auch Holzweichfaserplatte oder Weichholzfaserplatte genannt, sind wie bei allen Holzfaserplatten Fasern. Dämmstoffe aus Holzfasern können verschiedene Erscheinungsformen aufweisen. Die gebräuchlichste ist die Holzfaserdämmplatte. Des Weiteren werden die Fasern auch in Form von Matten, Rollen, Formstücken oder lose als Einblasdämmung eingesetzt. Hauptsächlich dienen sie dem Wärme- und Schallschutz, müssen unter Umständen auch Anforderungen des Brand-, Holz- und Feuchteschutzes erfüllen. Der Holzfaserteil beträgt ca. 85 %, die Herstellung erfolgt im Nass- und Trockenverfahren unter ggf. der Zugabe von Binde- und/oder Zusatzmitteln. Die Produktion nach dem Trockenverfahren ähnelt einer Faserplattenanlage (z.B. MDF), Unterschiede ergeben sich im Pressverfahren. Vorteil des Trockenverfahrens ist die Realisierung geringer Dichten zwischen 45 kg/m^3 und 200 kg/m^3 sowie Dicken von 5 mm bis 200 mm.

Die Anwendungsgebiete erstrecken sich von der Dach- und Wanddämmung (Aussenwände, Trennwände, Wärmedämmverbundsysteme) über die Dämmung des Bodens und der Decke (Luft- und Trittschalldämmung, Wärmeschutz von Geschossdecken und Bodenplatten) bis hin zu Einsätzen im Fahrzeugbau. Wie Spanplatten können auch Holzfaserdämmstoffplatten mit Gips, Zement oder Magnesit als organisch gebundenen Platten ausgestattet werden. Abb. 3-32 gibt einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten im Holzbau.

- | | |
|--|---|
| 1 Unterdeckungen | 5 Dämmung von Außenwänden mit Vorhangfassade |
| 2 Aufsparrendämmung | 6 Dämmung von leichten Trennwänden |
| 3 Zwischensparren- und Untersparrendämmung | 7 Luft- und Trittschalldämmung von Decken in Holzbauweise |
| 4 Wärmedämmverbundsysteme | 8 Wärmeschutz von Geschossdecken und Bodenplatten in Massivbauweise |

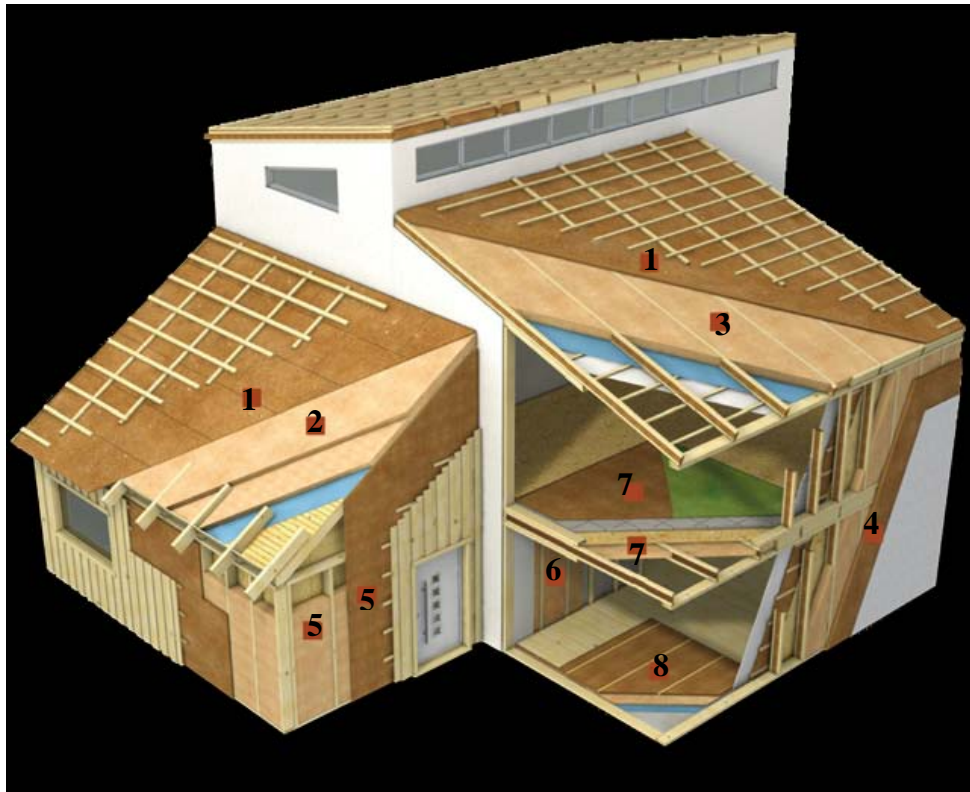


Abb. 3-32: Anwendungsübersicht von Holzfaserdämmplatten im Holzbau (Informationsdienst 2007)

Das Eigenschaftsprofil einer Holzfaserdämmplatte wird neben dem Bindemittel und dem Verfahren im Wesentlichen durch die Auswahl der Fasermaterialien bestimmt. Entscheidendes Kriterium ist wie bei den Faserplatten die Grösse und geometrische Struktur der Fasern. Kurze Fasern besitzen wenig Porenraum und verlangen einen hohen Bindemittelanteil, was zum Herabsetzen der Isoliereigenschaften führt. Ausserdem ist der Materialeinsatz höher. Auch durch zu viele lange und dicke Fasern isoliert der Dämmstoff schlechter, da die einzelnen Poren so gross sind, dass es innerhalb der Fasern zu Wärmeströmungen kommen kann (Hoppe 2005). Eine optimale Dämmung enthält daher einen ausgewogenen Mix aus kurzen, langen, dünnen und dicken Fasern mit ausreichender Festigkeit, geringer Dichte und guter Wärmeleitfähigkeit. Üblicher Rohstoff sind bisher Nadelhölzer, da sie aufgrund ihrer Faserstruktur Platten ergeben, die im Verhältnis zur Rohdichte eine hohe Festigkeit aufweisen. Wie bei den Faserplatten kann Schwachholz als Fasergrundlage dienen. Laubschwachholz würde sich demnach ideal dafür anbieten, da eine hochwertige, stoffliche Nutzung des Sortimentes damit verbunden ist.

Forschung: Da Faserplatten auch aus Laubholz hergestellt werden können (Lampert 1967; Autorenkollektiv 1975; Krug und Mäbert 2007) und der Herstellungsprozess ähnlich denen von Faserdämmstoffen ist, ist davon auszugehen, dass auch Laubhölzer für Faserdämmstoffe geeignet sind. Wichtig für einen qualitativ hochwertigen Dämmstoff ist die Auswahl geeigneter Hölzer, aus denen sich Fasern produzieren lassen, die den Anforderungen gerecht werden. Wie schon beschrieben, ist vor allem ein Mix aus unterschiedlich geformten Fasern entscheidend. Von daher sind Mischungen verschiedener Holzsorten nicht auszuschliessen. Neuere Untersuchungen (Bartholme et al. 2009) bestätigen den Einsatz von Fasern aus

Buchenholz für organisch gebundene Holzfaserdämmplatten hergestellt im sonst für Nadelholzfasern üblichen Nassverfahren. Der nachteiligen Fasergeometrie des Buchenholzes (kurz, woraus sich schlechtere Verzahnungseigenschaften ergeben) wurde mit der Zugabe von Kartoffelpülpe als Bindemittel entgegengewirkt. Kartoffelpülpe, ein Abfallprodukt der Kartoffelstärkeproduktion, zeichnet sich aufgrund eines Stärkegehaltes von 30 % durch gute Bindungseigenschaften aus. Den Platten wurde für die Untersuchungen 10 % Kartoffelpülpe beigemischt. Im Gegensatz zu reinen Buchenholzfaserdämmstoffplatten, zeichneten sich die Platten mit Kartoffelpülpe durch eine feste Struktur, gute Säge- und Schleifeigenschaften sowie Festigkeiten vergleichbar mit industriell hergestellten Dämmstoffplatten aus Nadelholz aus. Allein die Wärmeleitfähigkeit war mit Werten zwischen 0,066 und 0,067 W/mK etwas höher als der übliche Bemessungswert von 0,39 W/mK bis 0,045 W/mK (Informationsdienst 2007).

3. Holzfaserformteile

Holzfaserformteile werden in einem zweiteiligen Prozess erzeugt. Nach der Herstellung der lagerungsfähigen Fasermatte erfolgt die Umformung und Verdichtung unter Druck und Temperatur in die gewünschte Form. Oftmals werden Holzfasern genutzt, um Kunststoffe zu verstärken. Diese so genannten naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) zeichnen sich durch hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringer Dichte aus. Grosser Vorteil der Anwendung ist die Nutzung der im Gegensatz zur Holzverarbeitung schnell laufenden Extrusions- und Spritzgussmaschinen der Kunststoffindustrie. Da sie sehr leicht und trotzdem mechanisch stark belastbar sind, sind sie idealer Werkstoff für den LKW- und Automobilbau zur Tür- und Innenraumverkleidung oder für Hutablagen. Der Anteil an Holzfasern in diesem Verbundwerkstoff ist mit 70 % relativ hoch. Geeignet ist sowohl Nadel- als auch Laubholz, wobei jedoch im Moment Rohstoffe aus Nadelholz noch einen grösseren Anteil einnehmen. Als Verwertungsoption würde sich NFK aus Laubholzfasern anbieten, da gerade in der Automobilindustrie beträchtliche Mengen verarbeitet werden. Im Jahre 2005 setzte z.B. Deutschland 27.000 Tonnen Holzfasern zur Herstellung von NFK ein (Carus et al. 2008).

4. Wood-Plastic-Composites (WPC)

Wood-Plastic-Composites (WPC) sind thermoplastisch verarbeitete Verbundwerkstoffe, in denen Holzfasern oder auch –mehl mit einem Kunststoff unter der Zugabe von Additiven vereint werden. In der Verarbeitung und dem Aufbau ähneln sie sehr den NFKs. Es entsteht ein Werkstoff mit holzähnlicher Optik und zum Teil vorteilhafteren Eigenschaften als ein reiner Kunststoff. Die Produktion von WPC startete zu Beginn der 90er Jahre in Nordamerika und verzeichnete seitdem eine rasante Entwicklung. Bereits im Jahre 2005 wurden am nordamerikanischen Markt ca. 700.000 t WPC abgesetzt, was gegenüber 2003 eine Steigerung um 100.000 t bedeutete (Vogt 2006). Hauptanwendungszweck sind mit 70 % Terrassendielen. Mit beinahe 30 % wird WPC allerdings auch vermehrt für Zäune, Schallschutzwände, Gartenmöbel, Fassaden und Dächer genutzt. Einen kleinen Bereich stellt zudem der Möbelbau dar. Mit einem Anteil von 5 %– 90 % fungieren die Holzfasern neben dem Kunststoff als Hauptbestandteil des Produktes. Fasern besitzen den entscheidenden Vorteil, dass sie nicht nur wie Holzmehl als Füllstoff, sondern auch als festigkeitsgebende Komponente dienen. In der Wahl der Holzart sind die Produzenten relativ frei, da nicht nur Nadelhölzer, sondern ohne Probleme auch Laubhölzer eingesetzt werden können. Als Holzsortimente eignen sich Schwachholzsortimente sowie sämtliche Sägenebenprodukte aus der Schnittholzproduktion. Das Absatzvolumen von WPC steigt stetig, wobei vor allem im deutschsprachigen Raum Europas (Schweiz, Deutschland und Österreich) mit steigenden Tendenzen gerechnet wird (Vogt et al. 2006).

3.2.5 Leichtbauwerkstoffe

Leichtbauwerkstoffe werden zwar schon auf unterschiedliche Art und Weise eingesetzt, verzeichnen jedoch noch immer einen Aufwärtstrend. Sie zeichnen sich entweder durch geringere Rohdichten als die der verwendeten Rohstoffe oder die Nutzung der Struktur der Rohstoffe zur Festigkeitsbildung ohne Rohdichteerhöhung aus, um so Gewicht zu sparen bzw. die Gestalt zu optimieren. Wie ein Leichtbauwerkstoff gestaltet wird, hängt im Wesentlichen vom Anforderungsprofil der Konstruktion oder des Bauteils ab, so dass es ein- und mehrlagige Ausführungen gibt. Mehrlagige Leichtbauwerkstoffe bestehen meist aus einer Mittellage und zwei Decklagen, wobei diese unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Die Decklage muss überwiegend die an eine Oberfläche gestellten Anforderungen wie Beständigkeit gegenüber Feuchte, Abrieb und Feuer, Schutz der Mittellage sowie Aufnahme von Kräften und dekorative Zwecke erfüllen. Mittellagen dagegen dienen als Abstandhalter, Rohdichtedezimierer und Festigkeitsgeber. Form und Beschaffenheit beider Lagen können auf unterschiedlichste Art und Weise gestaltet werden. Materialien für die Mittellage sind z.B. Natur- und Polymerschäume, Holzleisten, Späne, Papier oder Metall, die wabenartig, stegförmig, als Schaum- oder Faserlage ausgeführt werden. Decklagen bestehen u.a. aus MDF, Furnier, Papier, Laminat, Sperrholz, Blech oder WPC.

Ein übliches Beispiel für die Kategorie sind stranggepresste Röhrenspanplatten als Mittellage für die Türenherstellung. Auf diese Weise wird im Verhältnis gesehen guter Schallschutz bei geringem Gewicht gewährleistet. Eine schon lange bekannte Anwendung ist Sperrholz aus Pappel, Buche oder Birke für den Einsatz im Flugzeugbau. Weiterhin bekannt sind Leicht-MDF und Ultraleicht-MDF mit Dichten unter 650 kg/m^3 bzw. 550 kg/m^3 . Bei der Sandwichbauweise wird erheblich an Gewicht gespart, indem die Dichte reduziert wird. Aufgebaut ist ein Sandwich aus einer relativ dünnen Deckschicht mit hohen Zug- und Druckfestigkeiten sowie einem dicken Kern, der die Decklagen abstützt und druckfest ist. Gerade mit Buche, Esche oder Eiche ließen sich aufgrund deren hoher Festigkeiten Decklagen für stabile Platten fertigen.

Zu finden sind Leichtwerkstoffe im Schiffs-, Messe- und Ladenbau sowie zur Realisierung von Regalen, Küchen, Türen und Verkleidungen. Ihnen wird vor allem für den Möbelbau eine wachsende Bedeutung zugesagt, da sie zu leichten Produkten führen.

3.3 Verwendung des Holzes nach Modifizierung

3.3.1 Ziele der Modifizierung

Modifizierungen helfen bestimmte Eigenschaften des Holzes entweder abzuschwächen oder zu verbessern. Hauptsächlich werden damit folgende Ziele bezweckt:

Tab. 3-12: Ziel der Holzmodifizierung

Ziel	Holzmodifizierung Schlagwort	betrifft
Herabsetzung der Hygroskopizität	Dimensionsstabilisierung	Wasseraufnahme, Quellung und Schwindung
Verbesserung der biotischen und abiotischen Widerstandsfähigkeit	Resistenzerrhöhung	Pilze, Insekten, Chemikalien, Wasser, UV-Strahlung
Veränderung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften	Eigenschaftsoptimierung	Härte, Festigkeit, Plastizität

3.3.2 Modifizierungsverfahren

Die Wahl des Verfahrens prägt das spätere Aussehen und Eigenschaftsprofil des Holzes, angepasst auf den späteren Verwendungszweck. Das Gebiet steht besonders im Interesse der Praxis und Wissenschaft, da sich durch Modifizierungen optimierte Holzprodukte schaffen lassen. Bereits existierende Einsatzgebiete werden erweiterbar, neue Felder erwerbbar oder kosten-, beschaffungs- oder kostenintensive Werkstoffe mitunter ersetzbar. Die Verfahren reichen hierbei von einfachen Behandlungen bis zu hochkomplexen Prozessen. Über die Möglichkeiten gibt die Abb. 3-33 Auskunft. Nach einer folgenden kurzen Beschreibung der Verfahren wird im Anschluss auf die derzeit wichtigsten unter Angabe von Eigenschaften, Methode, Einsatzfeldern und wissenschaftlichen Beiträgen eingegangen.

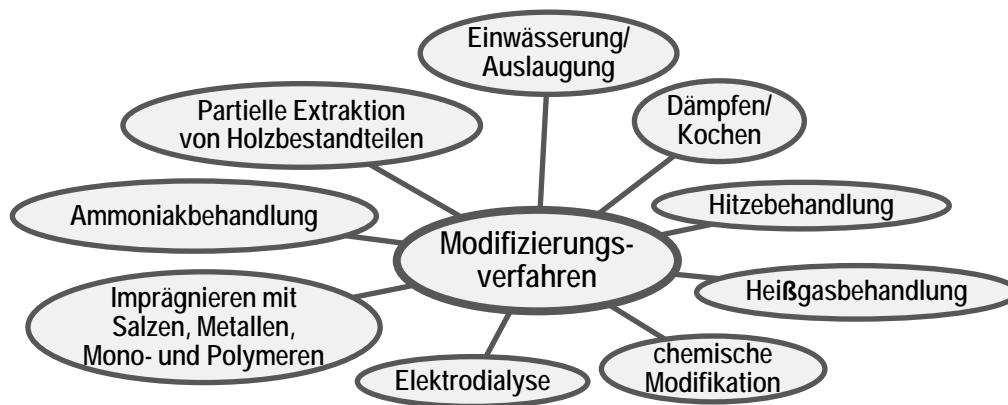


Abb. 3-33: Modifizierungsverfahren von Holz (nach Gutwasser 2005)

Einwässerung/Auslaugung

- ◆ Lagerung des Rundholzes zwei bis fünf Jahre in Gewässern oder Polteranlagen
- ◆ Herauslösen wasserlöslicher Bestandteile bis 5 %
- ➔ Dimensionsstabilisierung

Partielle Extraktion von Holzbestandteilen

- ◆ Kochung in verdünntem Natrium- und Calciumhydroxid
- ◆ partielle Extraktion von Lignin und den Hemicellulosen
- ➔ Verbesserung der Elastizität und Plastizität

Ammoniakbehandlung

- ◆ Begasung oder Tränkung mit Salmiakgeist, „Holzräuchern“
- ➔ Dunkelfärbung, Plastifizierung im nassen Zustand, Verdichtung nach Trocknung

Partielle Extraktion von Holzbestandteilen

- ◆ elektrolytische Abscheidung (500 bis 700 V) wasserlöslicher Kolloide und Mineralstoffe
- ➔ geringfügige Dimensionsstabilisierung

Heißgasbehandlung

- ◆ Imprägnieren und Trocken von grünem Holz mit Rauchgasen bei Temperaturen von ca. 240 °C innerhalb von vier Tagen auf Fasersättigungsfeuchte + zusätzliche technische Trocknung innerhalb von drei Tagen auf 10 °C Feuchte

- ◆ Prozesse: Veretherung von Hydroxylgruppen, Abspaltung von Konstitutionswasser, Polymerisation von Abbauprodukten des Lignins
- ➔ erhebliche Reduzierung des Quells und Schwindens, Dunkelfärbung

Dämpfen/Kochen

- ◆ beide Verfahren dienen dem gleichen Zweck: Abtöten von Schädlingen, Abbau von inneren Spannungen, Farbänderungen, Plastifizierung für die weitere Verarbeitung (Biegen, Furnierherstellung)
- ◆ Dämpfparameter: Druck 0,2...0,5 MPa, Temperatur: 130...145 °C; Verfahren direkt oder indirekt
- ◆ Kochparameter: Temperatur: 85 °C; Holz komplett unter Wasser getaucht
- ◆ Prozesse: Hydrolyse der Hemicellulosen und Mittelamelle
- ➔ Dunkelfärbung, Verminderung der Quellung (ca. 25 % bei Rotbuche)
- ➔ Plastifizierung (E-Modulabnahme um ca. 75 % bei Buche) ➔ = Biegeholz (siehe Abschnitt 3.3.5.3 Forschung und Entwicklung unter Biegeholz)

Chemische Modifikation

- ◆ Eigenschaftsveränderung aufgrund der Behandlung von Holz mit Chemikalien
- ◆ Prozesse: je nach Verfahren kommt es zum Austausch funktioneller Gruppen des Holzes mit denen des Reagens und/oder Vernetzung der Gerüstsubstanz der Zellwand
- ◆ Behandlung des Holzes mit z.B. Essigsäureanhydrid oder Furfurylalkohol
- ◆ Ver- und Bearbeitbarkeit meist wie unbehandeltes Holz
- ➔ Dimensionsstabilisierung
- ➔ Erhöhung der Resistenz
- ➔ verfahrensabhängig: geringere Anfälligkeit gegen Fotooxidation und Erosion, Zunahme der Rohdichten und Festigkeiten

Imprägnierung mit Metallen, Nichtmetallen, polymerisierbaren Chemikalien, Mono- und Polymeren

- ◆ Einlagerung von Stoffen in die Zellhohlräume und/oder Zellwände mittels Tauch- oder Druckverfahren
- ◆ Metalle: Zinn, Blei, Wismut bzw. Legierungen= Metallholz
- ◆ Mono- und Polymere: Styrol, Phenolharze, Harnstoffharze, Styrol, Melaminharze
- ◆ weiterhin: polymerisierbare Chemikalien
- ➔ je nach Behandlung Erhöhung der Abrieb- und Verschleissfestigkeit, Härte, Resistenz, Senkung der Wasseraufnahme

Hitzebehandlung

- ◆ Erhitzung des Holzes auf Temperaturen zwischen 170 bis 250 °C
- ◆ Heutige Verfahren: Behandlung mit Wasserdampf; Behandlung mit Inertgas im Autoklav; Behandlung mit heissem Öl; Vakuumpresstrocknung
- ◆ Prozesse: Abbau der Hemicellulose, Abbau und teilweiser Umbau des Lignins, Austreiben flüssiger Akzessorien, Abbauprodukte sind organische Säuren
- ◆ Einsatzgebiete: Fassaden, Lärmschutzwände, Fenster, Türen, Fussböden
- ◆ Nachteile: Verlust statischer Festigkeit und Härte, Versprödung, zum Teil rauchiger Geruch, keine Farbstabilität, aber:
- ➔ Dimensionsstabilisierung (Reduzierung der Anzahl an Hydroxylgruppen)
- ➔ Resistenzerhöhung
- ➔ Dunkelfärbung (Tropenholzersatz, Ausgleich von Farbunterschieden)

3.3.3 Nähere Beschreibung einiger Verfahren

Biegeholz

Die Geschichte des Biegens geht bis auf die Zeit der alten Ägypter zurück. Ihren Höhepunkt erreichte sie jedoch vor 1900 durch Michael Thonet, der mit seiner Methode das Verfahren revolutionierte. Nachdem er bis dahin nur in Leim gekochte Furnierstreifen biegen konnte, gelang es ihm schliesslich Massivholzteile mittels heissem Wasserdampf zu verformen. Um das Reissen des Holzes zu vermeiden, spannte Thonet es auf ein Stahlband, wodurch eine Bewegung in Längsrichtung verhindert wurde. Infolgedessen waren viel engere Biegeradien realisierbar, da die Holzfasern nicht nur gebogen sondern gestaucht wurden. Um 1859 entstand der wohl berühmteste „Sessel Nr. 14“ oder auch „Wiener Kaffeehausstuhl“, von dem allein bis 1930 über 50 Mill. verkauft wurden. Das Familienunternehmen besteht heute noch und besitzt mittlerweile europaweite Niederlassungen. Zum Biegen eignen sich vornehmlich Laubhölzer. Nadelhölzer lassen sich aufgrund ihrer sprunghaft wechselnden mechanischen Eigenschaften von Früh- zu Spätholz schlecht verformen (Kollmann 1951). Besonders gut biegsam sind Rotbuche, Esche, Hickory und Ruster, geeignet sind allerdings auch Ahorn, Birke, Robinie, Kirsche, Haselnuss und Eiche. Die Erkenntnis von Thonet - gestauchtes Holz ist besser biegsam - erfuhr eine Weiterentwicklung und wurde 1917 in Deutschland als sogenanntes „Patent-Biegeholz“ vom damaligen Reichspatentamt rechtlich geschützt. In den 1920er Jahren startete u.a. die Gesellschaft für Holzveredelung mbH in Essen mit der Produktion von „Patent-Biegeholz“ in Längen bis 1,65 m. Im Laufe der Zeit entdeckte der Flugzeug-Modellbau dieses Material für sich. Die Gesellschaft für Holzveredelung mbH ist heute im Besitz der Firma Candidus Prugger. Anlagen ermöglichen inzwischen eine gleichmässige Stauchung über die gesamte Länge, wobei die eigentliche Verformung immer noch nach dem patentierten Verfahren von 1917 funktioniert. Laubhölzer wie Buche, Eiche, Esche, Nussbaum und Ahorn mit einem Querschnitt von 10 x 12 cm und einer Länge bis 2,80 m werden gedämpft und auf 80 % der ursprünglichen Länge gestaucht. Nach Trocknung weisen die Kanteln eine Länge von 2,20 m und eine Feuchte von 14 % auf. Aus dem heute unter dem Namen registrierten Bendywood® können anschliessend die benötigten Formen, evtl. mit Profilierungen versehen, ausgearbeitet werden und bis zu Radien von 1:10 gebogen werden. Für das Biegen werden keine speziellen Anlagen benötigt, kleine Querschnitte sind mit der Hand verformbar, grössere z.B. mit konventionellen Schlossereimaschinen.



Abb. 3-34: Tischlampe und Ring aus Bendywood® (www.bendywood.com)

Ammoniakbehandlung

Das Räuchern von Eiche mit Ammoniak ist ein seit Jahrhunderten bekanntes Verfahren. Aufmerksam sind die Menschen darauf geworden durch die Verdunkelung von in Bauernhäusern stehenden Eichenmöbeln aufgrund tierischer Ausscheidungen. Die Begasung eignet sich jedoch nur für gerbstoffhaltige Hölzer wie Eiche. Eine weitere Möglichkeit ist die direkte Behandlung mit wässriger Ammoniaklösung, wobei die Konzentration die Eigenschaftsveränderung des Holzes bestimmt. Eine 2 %-ige Lösung setzt Harze und Fette frei, eine 10 %-ige dagegen extrahiert die Hemicellulosen und plastifiziert das Holz im nassen Zustand. Durch Trocknung und Verdichtung steigen Rohdichte und Festigkeit. Viele Untersuchungen fanden dazu in den 1960er und 1970er Jahren statt, da eine schnellere und intensivere Plastifizierung als mit Wasser oder Wasserdampf möglich war. Nach Aussagen von Bērziņš (1972) können mit Ammoniak behandelte und anschliessend verdichtete Weichlaubhölzer wie Birke und Erle ein Substitut für harte Laubhölzer sein. Oniško und Matejak (1971) untersuchten Eichenkern-, Rotbuchen- und Kiefernholz auf ihr Verhalten gegenüber 25 %-iger Ammoniaklösung. Die Proben wurden allerdings nur getrocknet und nicht verdichtet. Im atro-Zustand wiesen vor allem die Eiche und Rotbuche deutlich höhere Druck-, Zug- und Biegefestigkeiten auf. Besonders die Biegefestigkeit stieg mit 30 % bei Eiche und 20 % bei Buche erheblich an. Oberhalb von 10 % Holzfeuchte fielen dagegen die Werte unter die der Kontrollproben. Die Behandlung von Buchen- und Eichenholzspänen mit 6 %-iger Ammoniaklösung führte zu niedrigeren pH-Werten und Pufferkapazitäten. Zu Platten verpresst zeigten die Späne eine höhere Verdichtbarkeit in den Deckschichten gegenüber den nicht behandelten (Parameswaran und Roffael 1984).

Chemische Modifizierung

Unter den Begriff der chemischen Modifizierung fallen in dieser Recherche Verfahren, welche Wechselwirkungen zwischen Holz und der eingesetzten Chemikalie hervorrufen. Grundsätzlich fällt darunter auch die Ammoniakbehandlung. Da jedoch hier nicht die Hydrophobierung, sondern die Plastifizierung im Vordergrund stehen, wurde dieses Verfahren als Extrapunkt behandelt.

Im Laufe der Jahre wurde eine Reihe von Chemikalien auf ihre Tauglichkeit zur Holzmodifizierung untersucht, von denen jedoch nur wenige den Sprung zur Anwendung schafften. Das am meisten untersuchte und auch industriell umgesetzte Verfahren ist die Acetylierung, bei der eine Behandlung vorzugsweise mit Essigsäureanhydrid erfolgt. Die wasseranziehenden Hydroxylgruppen des Holzes werden hierbei zu wasserabweisenden Acetylgruppen verestert. Erste Versuche, Holz zu acetylieren, fanden in Deutschland in den 1920er Jahren statt. Fuchs (1928) fand heraus, dass sich der Acetylgehalt von Fichtenmehl von 2,7 auf 41 % durch die Behandlung mit Essigsäureanhydrid und Schwefelsäure als Katalysator anheben lässt. Tarkow (1945) wies als erster nach, dass acetyliertes Balsaholz resistent gegenüber Fäulepilzen ist. Mit der Prüfung von acetylierten Laub- und Nadelholzurnieren beschrieben Tarkow et al. (1946) als erste die Möglichkeit, das Quellen und Schwinden zu minimieren. Im Laufe der Jahre erfolgten weltweit Untersuchungen, bei denen die Eignung verschiedenster Hölzer und Katalysatoren unter die Lupe genommen wurde. Besonders wichtig war den Forschern zudem die Stabilität einer Acetylierung. Es wurde aufgezeigt, dass sich der Acetylgehalt selbst nach 41 zyklischen klimatischen Belastungen (3 Monate 30 % relative Luftfeuchte gefolgt von 3 Monaten 90 % relative Luftfeuchte) nur minimal ändert (Rowell et al. 1992b; Rowell et al. 1992a). Versuche für eine Langzeitbewertung innerhalb von 20 Jahren laufen derzeit. Militz (1991) beschäftigte sich mit den Eigenschaften von acetylierter Buche, ein Holz, was bis dahin in Mitteleuropa noch nicht untersucht wurde. Aufgrund seiner hohen Volumenquellung und -schwindung sowie seiner

geringen natürlich Dauerhaftigkeit ist diese Art der Modifizierung für Buchenholz besonders interessant. Ungedämpfte Buchenproben wurden mit Essigsäureanhydrid ohne Katalysator unter Vakuum und Druck imprägniert und anschliessend auf Quell- und Schwindverhalten, Dauerhaftigkeit und Druckfestigkeit getestet. Alle drei Eigenschaften erfuhren eine geringe bis sehr deutliche Verbesserung. Vor allem das Quellen und Schwinden wurde gegenüber unbehandeltem Holz in radialer und tangentialer Richtung um 60-80 % reduziert. Auch nach intensiver Auswaschung bleibt dieser Effekt bestehen. Weiterhin wurde die Wasseraufnahme erheblich herabgesetzt. Die im Naturzustand nicht dauerhafte Buche erwies sich nach der Modifizierung als resistent gegenüber Weiss- und Braunfäulepilzen. Der E-Modul veränderte sich nicht, die Druckfestigkeit dagegen wurde um 10 % erhöht.

Das niederländische Unternehmen Titan Wood Limited brachte den Herstellungsprozess in Europa mit der Errichtung einer grosstechnischen Anlage in Arnheim 2006 zur industriellen Reife. Die Jahreskapazität liegt bei 30.000 m³. Erhältlich unter dem Namen „Accoya“ setzt das Unternehmen dafür im Moment überwiegend das Plantagenholz Radiata-Kiefer ein. Die Entwicklung fand in Zusammenarbeit mit dem deutschen Holzhändler Enno Roggmann statt, der seit 2007 auch selbst Accoyaprodukte, vor allem Fensterelemente, vertreibt. Eingesetzt werden kann das Material jedoch für viele weitere Anwendungen wie Terrassenbeläge, Fasserverkleidungen, Kanalauskleidungen, Türen und Möbel für den Aussenbereich. Auch für tragende Holzkonstruktionen ist das Material geeignet. Im friesischen Ort Sneek wurden 2008 und 2009 zwei Verkehrsbrücken errichtet (Abb 3-35). Nach Berechnungen wird der Brücke eine Lebensdauer von 80 Jahren vorausgesagt.

Ein weiteres Verfahren, welches vor kurzem in die Praxis umgesetzt wurde, stammt von der norwegischen Firma Kebony ASA. Sie entdeckten die Behandlung des Holzes mit Furfurylalkohol für sich, ein Verfahren, was erstmalig in den 1950er Jahren untersucht wurde, allerdings in Vergessenheit geriet und erst in den 1990er Jahren wieder entdeckt wurde. Der Praxistauglichkeit gingen jahrelange Entwicklung und Forschung voraus. Bei der sogenannten „Kebonisierung“ wird zusätzlich zur Hydrophobierung der Hydroxylgruppen die Gerüstsubstanz der Zellwand vernetzt, was zu deutlich höheren Rohdichten und Festigkeiten führt. Furfurylalkohol entsteht aus der katalytischen Reaktion von Furfural, ein Stoff, der aus Zuckerrohr, Sonnenblumen und Maiskolben gewonnen werden kann. Hölzer, die von Kebony modifiziert werden, sind Kiefer, Radiata Pine, Southern Yellow Pine, aber auch Ahorn und Buche. Die Produkte zeichnen sich durch eine hohe Resistenz, Dimensionsstabilität und Festigkeit, vergleichbar mit tropischen Hölzern, aus. Vorteil oder je nach Sichtweise auch Nachteil ist das Dunklerwerden des Holzes ähnlich einer thermischen Modifizierung. Erfolgreich eingesetzt wurde „Kebony“ schon im Aussenbereich für Fassaden, Bootsstege, Terrassen, Brücken und Yachten, ist jedoch ebenso für den Möbel- und Innenausbau geeignet. Interessant könnte der Werkstoff für den Fenster- und Türenbau werden. Um den Anforderungen dafür gerecht zu werden, wurde 2009 das Win-Fur-Projekt gestartet, ein Zusammenschluss verschiedener Holzforschungsinstitutionen aus Norwegen, Schweden und Deutschland sowie von Vertretern der Fensterbranche. Ziel des Projektes ist die Zertifizierung des Materials für den Fensterbau (Sander 2010).

Imprägnierung mit Metallen, polymerisierbaren Chemikalien, Mono- und Polymeren

Grundgedanke des Imprägnierens ist die Einlagerung von Stoffen in die Zellhohlräume und/oder Zellwände mittels Tauch- oder Druckverfahren.

Metalle: Silicium kann in Form von Wasserglas oder Polysiloxanen unter Druck und Temperatur in das Holz eingebracht werden. Nach Entwässerung und Luftentzug erstarrt Wasserglas gallertartig in den Zellhohlräumen, die Polysiloxane reagieren mit den

Hydroxylgruppen zu Holz-Siliziumoxid-Kompositen. Das behandelte Holz zeichnet sich durch bis zu 65 % höhere Festigkeiten und Härten sowie eine erhöhte Resistenz gegenüber Schädlingen und Feuer aus (Gutwasser 2005). Kollmann (1951) beschreibt die Tränkung des Holzes mit flüssigem Zinn, Blei, Antimon und deren Legierungen zu Metallholz. Besonders geeignet sind zerstreutporige Laubhölzer. Härte und Rohdichte steigen in Abhängigkeit vom Metall, jedoch ist von Härten auszugehen, die den doppelten bis dreifachen Wert des Holzes aufweisen. Metallholz ist sehr verschleiss- und abriebfest und lässt sich hobeln, bohren, sägen und leimen. Gegenwärtige Anwendungen oder Untersuchungen konnte allerdings für beide Verfahren nicht gefunden werden.

polymerisierbare Chemikalien: Innerhalb des Verbundprojektes „Innovative modifizierte Buchenholzprodukte“ gelang es dem Institut für Holzbiologie und Holztechnologie der Universität Göttingen in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungsinstituten und Kleinunternehmen die Eigenschaften des Buchenholzes so zu verbessern, dass es für den Aussenbereich geeignet ist. Unbehandeltes Buchenholz zeichnet sich naturgemäss durch geringe Dimensionsstabilität und eine schlechte Dauerhaftigkeit (Dauerhaftigkeitsklasse 5) aus. Eine Vakuum-Druck-Imprägnierung mit einer wasserbasierten DMDHEU-Lösung (Dimethyloldihydroxyethyleneurea) dagegen führt zu geringerem Quellen und Schwinden und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit in Klasse 1 bis (sehr dauerhaft/dauerhaft). Die Festigkeiten werden unterschiedlich beeinflusst. Herausragend ist die Druckfestigkeit mit einer Steigerung um bis zu 60 %. Biegefestigkeit und Elastizität bleiben annähernd unverändert. Zugfestigkeit, aber vor allem die Bruchschlagarbeit sind reduziert (Bollmus et al. 2009). Das Aussehen wird durch die Behandlung nicht negativ beeinträchtigt, das Holz verfärbt sich lediglich etwas dunkler. Erste Produkte wurden und werden auf ihre Praxistauglichkeit geprüft. Besonders hervorzuheben ist die Dauerhaftigkeit, andere Eigenschaften wie z.B. die Rissbildung nach starken Witterungseinflüssen sind nach Aussagen der Wissenschaftler noch zu optimieren. Weiterhin ist die Herstellung noch ziemlich kostenintensiv. Allerdings stellt das Verfahren trotz der derzeitigen Schwierigkeiten eine vielversprechende Möglichkeit dar, das Anwendungsfeld der Buche zu erweitern.

Mono- und Polymere: Diese Art der Imprägnierung wird schon seit Jahrzehnten praktiziert. Als Imprägniermittel dienen hauptsächlich Styrol, Phenol-, Harnstoff- oder Melaminharze. Frühere geläufige Begriffe waren Polymerholz (engl. wood-polymer-composite), Lignofol, Lignoston und Lignomer. Unter der eingetragenen Marke Lignostone® vertreibt die Röchling Haren AG auch heute Kunstharzpressholz, wobei es sich um mit Kunstharz getränkte Buchenholzurniere handelt, die unter Druck und Wärme verpresst werden. Für eine Modifizierung dieser Art wurde das Holz evakuiert (Entziehen der Luft), mit einem flüssigen Mono- oder Polymer getränkt und anschliessend mit Druck, Wärme oder Gammastrahlung polymerisiert. Resultat war ein Material mit einer wesentlich besseren Dimensionsstabilität, Dauerhaftigkeit und höheren Festigkeiten (Kollmann 1951, Lutomski und Lawniczak 1977). Vorübergehend in Vergessenheit geraten lebte die Kunstharzimprägnierung Anfang der 1990er Jahre wieder auf und wurde optimiert. Heute werden Kunstharze hauptsächlich für die Herstellung von Spanplatten genutzt.

Thermische Modifizierung

In den letzten Jahren ist ein verstärktes Interesse an der thermischen Modifizierung zu beobachten. Dies zeigt sich an der zunehmenden Anzahl von Anbietern von Thermoholz und wissenschaftlichen Beiträgen. Das hat zur Folge, dass Thermoholz nicht mehr nur ein Thema in Fachkreisen ist, sondern zusehends der Bekanntheitsgrad im Baugewerbe, aber auch unter der Bevölkerung steigt. Im folgenden werden Verfahrensanbieter, Hersteller und ausgewählte Forschungsarbeiten vorgestellt (Tab. 3-13).

Tab. 3-13: Verfahren, Wirkprinzip, Hersteller und Produktionskapazität von Thermoholz (nach IHD „Merkblatt Nr. 6 „Verfahren zur Herstellung von TMT und www.timber-online.net)

Verfahren	Wirkprinzip	Hersteller	Produktionskapazität [m³]
ThermoWood, VTT-Verfahren	Wasserdampf + Holzgase, Atmosphärendruck	Mitglieder und Lizenznehmer der Finnish ThermoWood Association	ca. 120.000
Stellac	prinzipiell wie Thermowood-Verfahren, wird aber als eigenständige Technologie vermarktet	Qy SWM-Wood Ltd (FI) STIA Holzindustrie GmbH (A) Tre-Timber (EST) Firstwood GmbH (D)	10.000 k.A. 15.000 8.500
Celloc Mahlid Perdure	Wasserdampf+Holzgase, Atmosphärendruck; ähnlich ThermoWood-Verfahren, spezielle Ausgestaltungen und Details	Fromsseier (DK) Hagensieker (D) Perdure	k.A. 10.000 k.A.
Mühlbock	Holzgase, Atmosphärendruck	Mirako (A), Mafi (A)	10.000 k.A.
BICOS	Wasserdampf + Holzgase, leicht erhöhter Druck	BikoS GmbH (D), ehemals Thermoholz Spreewald GmbH	6.000
WTT	Wasserdampf + Holzgase, erhöhter Druck (im Autoklav)	Corbat-Holding SA, Ets Röthlisberger (CH)	800-1.000
Plato	Autoklav mit erhöhtem Druck und nachgeschaltete Hochtemperaturbehandlung	Plato International BV	25.000
Opel Therm	Vakuumpresse (Kontakterwärmung)	Prodeo SA (CH); timura Holzmanufaktur GmbH (D)	4.000-5.000 k.A.
NOW, Rétification Baladur	Inertgas Stickstoffatmosphäre	Retified®Wood (bois retifié): mehrere Hersteller in Frankreich Balz Holz AG (CH)	k.A. 3.500
OHT	Tränkbad aus erhitztem Rapsöl	Menz Holz (D)	1.700

Forschung: Schon vor mehreren 1000 Jahren versuchte die Menschheit mittels „Ankohlen“ Holz haltbarer zu machen. Auf diese Weise wurden vor allem Pfähle und Zäune behandelt. Erste Arbeiten zur Behandlung von Holz mit Hitze stammen aus den 1920er Jahren. Stamm und Hansen (1937) untersuchten das Quellen und Schwinden von thermisch behandeltem Holz. Stamm et al. (1946) dokumentierten weiter die Erhöhung der Resistenz unter einem heißen Metallbad bei gleichzeitigem Festigkeitsverlust. Es entstand der Begriff „Staybwood“, womit die Wissenschaftler „heat-stabilized wood“, also hitzestabilisiertes Holz, meinten. Weitere Untersuchungen bestätigten höhere Resistenzen, aber auch höhere Festigkeitsminderungen bei der Erhitzung des Holzes unter der Oberfläche eines geschmolzenen Metallbades im Gegensatz zur Behandlung in heisser Luft (Stamm et al. 1955). Die Autoren schlussfolgerten, dass sich diese Methode für einen kommerziellen Zweck noch nicht lohnt. Kollmann und Schneider (1963) gelangten aus ihren Untersuchungen zu der Meinung, dass die Dimensionen des Vollholzes am einfachsten und billigsten durch die Erwärmung auf hohe Temperaturen stabilisiert werden können. Mit der Wärmebehandlung im Autoklaven unter Druck gelang es Burmester (1973), das Quellen und Schwinden von Eichen-, Buchen-, Fichten- und Kiefernholz entscheidend zu minimieren, was zum Feuchte-Wärme-Druckverfahren (FWD) führte. Giebeler (1983) entwickelte dieses Verfahren weiter, nutzte allerdings eine Stickstoffatmosphäre. Damit gelang ihm mit Proben von Buche, Birke, Pappel, Kiefer, Fichte und Holzwerkstoffen eine Dimensionsstabilisierung von 50-80 % sowie eine verbesserte Dauerhaftigkeit.

Seit den 1990er Jahren folgten zahlreiche Arbeiten in Europa mit dem Ergebnis weiterer Kenntnisse und Verfahren. So wurde Anfang 2000 die Behandlung des Holzes in Pflanzenöl entwickelt. Patzelt et al. (2002) untersuchten den Einfluss verschiedener Parameter auf Eigenschaften von Fichtenthermoholz hergestellt nach dem FWD-Verfahren unter Stickstoffatmosphäre. Mit steigender Temperatur, Feuchte und steigendem Druck nahm der Abbau der Holzsubstanz zu. Das wiederum wirkte sich positiv auf Quellen und Schwinden, Sorptionseigenschaften und Rissbildung aus. Reduziert wurden dagegen die Scher- und Klebfestigkeit. Die durch Verwitterung hervorgerufene Vergrauung ist gleich der unbehandelten Hölzer. Bei Versuchen zur thermischen Behandlung von Fichte in Rapsöl und im Autoklav unter Stickstoffatmosphäre und Überdruck beobachteten Bächle und Niemz (2005) zum Teil deutliche Reduzierungen der Biegefestigkeit, Härte und Bruchschlagarbeit, aber auch eine Verminderung der Quellung um bis zu 50 %. Auch sie stellten fest, dass eine Thermobehandlung nicht UV-stabil ist. Resistenzprüfungen führten u.a. Bächle et al. (2004) an mit Öl-Hitze-behandeltem Fichtenholz durch und zeigten auf, dass der Abbau abhängig von der Pilzart ist. Im Gegensatz zu geringeren Masseverlusten gegenüber Braunfäuleerregern waren die Masseverluste durch den Weissfäulepilz *Trametes versicolor* höher als die der unbehandelten Proben. Trotzdem kann insgesamt von einer höheren Resistenz ausgegangen werden. Ein vom IHD herausgegebenes Merkblatt ordnet Thermoholz aus Fichte und Kiefer der Dauerhaftigkeitsklasse 2-4 (dauerhaft bis wenig dauerhaft) und thermisch modifizierte Buche und Esche der Klasse 1-2 (sehr dauerhaft bis dauerhaft) zu (Anonymus 2008b).

Im Laufe der Zeit rückt zusehends das Laubholz in den Blickpunkt der Forschung, da mit dessen mechanischen Eigenschaften und der vielfältigeren Optik das Anwendungsfeld erweitert werden kann. Auch für besonders schwer absetzbare Sortimente wie rotkernige Buche oder braunkernige Esche wird mit der thermischen Behandlung eine Möglichkeit geschaffen Farbunterschiede auszugleichen. Oelhafen (2005) zeigte, dass mit Behandlungstemperaturen um die 180 °C in Sauerstoffatmosphäre durch die Dunkelfärbung des Holzes Farbdifferenzen reduziert werden können (Abb. 3-36). Die dunklen Streifen des Farbkernes der Buche verfärbten sich mitunter nicht ganz so stark und markierten sich nach der Behandlung als etwas hellere Stellen. Bei der Esche wurde derartige Verhalten nicht beobachtet.



Abb. 3-35: Behandlung von Buche (links) und Esche (rechts) bei 180 °C und unterschiedlicher Dauer. Von links nach rechts: unbehandelt, 6h, 12h, 24h (Oelhafen 2005)

Weiterhin wurden industriell von der Balz Holz AG im Autoklav unter Sauerstoffatmosphäre wärmebehandeltes Ahorn-, Buchen- und Eschenholz nach dem FWD-Verfahren von Bächle und Schmutz (Oelhafen 2005) bezüglich Rohdichte, Gleichgewichtsfeuchte, Biege-E-Modul, Brinellhärte, pH-Wert und Wärmeleitzahl geprüft. Zur Anwendung kamen zwei Behandlungsstufen unterschiedlicher Intensität (Stufe 2 und 3). Die Ergebnisse können folgendermassen zusammengefasst werden:

- ◆ Abnahme der Rohdichte mit steigender Behandlungsintensität
- ◆ Abnahme des Biege-E-Moduls bei Ahorn und Buche, Zunahme bei Esche

- ◆ Abnahme der Biegefestigkeit bei intensiverer Behandlung
- ◆ Abnahme der Härte
- ◆ Reduzierung der Quellung und Gleichgewichtsfeuchte mit steigender Behandlungsintensität, Rückgang der Quellung um bis zu 60 %, anisotropes Verhalten bleibt bestehen
- ◆ Verminderung des pH-Wertes
- ◆ je intensiver die Behandlung umso dunkler die Proben

Auch hier war es möglich, Farbdifferenzen in Folge eines fakultativen Farbkernes zu beseitigen. Anders als bei der von Oelhafen durchgeführten Behandlung unter Sauerstoffatmosphäre traten hier bei der Buche mit Rotkern keine helleren Streifen auf. Tabelle 3-14 können die ausführlichen Ergebnisse entnommen werden:

Tab. 3-14: Mechanische Kennmittelwerte von unbehandeltem und in Sauerstoffatmosphäre behandeltem Thermoholz aus Ahorn, Buche und Esche nach Ergebnissen von Bächle und Schmutz (2006)

Holzart	Rohdichte bei 20 °C, 65 % r.L. [g/cm ³]	Holzfeuchte [%]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]	Biege-E-Modul [N/mm ²]	Brinell-Härte Druckricht. tangential [N/mm ²]	Brinell-Härte Druckricht. radial [N/mm ²]
Ahorn* Stufe 2	0,561	6,2	95,3	0,90	12009	22,4	30,4
Ahorn Stufe 3	0,564	5,5	46,7	0,45	10059	17,5	25,1
Buche unbehandelt	0,738	10,9	132,8	2,07	13140	39,3	42,2
Buche Stufe 2	0,692	9,1	76,7	0,78	11092	29,5	34,6
Buche Stufe 3	0,656	8,7	53,8	0,51	11776	16,6	20,5
Esche unbehandelt	0,633	10,3	97,6	1,68	9503	33,2	36,9
Esche Stufe 2	0,659	8,1	96,5	0,90	12002	36,7	33,4
Esche Stufe 3	0,560	5,9	44	0,44	10313	20	24,1

*Anm.: dem Bericht zufolge stand für Ahorn unbehandelt kein Holz bereit

2; 3= zwei unterschiedliche Behandlungsstufen

r.L.= relative Luftfeuchte

Nachteil des Thermoholzes ist der mitunter stechende Geruch nach Essigsäure, wobei die Intensität von der Verfahrensweise abhängt. Im Rahmen eines laufenden Projektes an der ETH Zürich wird an industriell hergestelltem untersucht, inwieweit sich die Emissionen durch die Veränderung der Prozessparameter verringern und diese die physikalisch-mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Geprüft werden unbehandeltes sowie in Wasserdampf- und Stickstoffatmosphäre wärmebehandeltes Eschen-, Buchen- und Fichtenholz nach zwei Behandlungen mit unterschiedlichen Prozessparametern. Neben den chemischen Analysen (pH-Wert, Ameisen-, Essigsäure-, Furfural-, Formaldehydabgabe) finden gleichzeitig Untersuchungen der physikalisch-mechanischen Eigenschaften statt. Im Moment liegen folgende Ergebnisse nach der ersten Behandlung vor (Wetzig 2010):

Tab. 3-15: Chemische und mechanische Mittelkennwerte von unbehandeltem und in Wasserdampf- und Stickstoffatmosphäre behandeltem Thermoholz aus Buche, Esche und Fichte nach der ersten Behandlung von Wetzig (Wetzig 2010)

chemische Analyse		pH-Wert	Formaldehydabgabe	Furfuralabgabe	Säureabgabe	
			[mg/1000g atro]	[mg/100g atro]	Ameisen- [mg/100g atro]	Essig- [mg/100g atro]
Unbehandelt	Buche	3,72	0,35	2	1	31
	Esche	3,70	1,29	1,4	1	20
	Fichte	3,50	3,75	1,7	4	58
Wasserdampf- atmosphäre	Buche	2,83	2,19	176,7	112	2378
	Esche	2,84	1,34	74,3	154	1534
	Fichte	2,96	3,20	66,4	119	430
Stickstoff- atmosphäre	Buche	2,72	1,92	215,3	212	1156
	Esche	2,80	1,45	118	207	988
	Fichte	2,94	5,94	81,9	100	511
Zusammenfassung in Bezug auf unbehandeltes Holz		- ↓ auf pH-Werte unter 3	- ↑, ausser Fichte in Wasserdampfa.	- ↑ um das ca. 50-fache (Fichte) bis 108-fache (Buche)	- deutliche ↑, besonders Essigsäureabgabe	
Physikalisch mechanisch Eigenschaften		Rohdichte bei 20 °C, 65 % r.L.	Brinellhärte	Bruchschlagarbeit	3-Punkt-Biegeprüfung	
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[kJ/m ²]	Biegefestigkeit [N/mm ²]	Biege-E-Modul
Unbehandelt	Buche	0,64	27,51	63,61	109,62	12,54
	Esche	0,67	35,77	70,10	124,31	13,62
	Fichte	0,46	15,37	46,30	87,71	11,89
Wasserdampfa tmosphäre	Buche	0,61	18,79	39,79	76,77	13,06
	Esche	0,62	23,99	39,17	79,58	13,63
	Fichte	0,45	12,22	35,01	63,14	12,10
Stickstoff- atmosphäre	Buche	0,59	19,97	32,91	66,70	12,44
	Esche	0,61	29,57	36,56	82,76	14,09
	Fichte	0,46	12,58	30,22	65,38	12,68
Zusammenfassung in Bezug auf unbehandeltes Holz		- Buche: ↓ um 5,3% bis 8,5% - Esche: ↓ um 6,5% bis 7,6% - Fichte: kaum Änderung	- Buche: ↓ um 27-32% - Esche: ↓ um 17-33% - Fichte: ↓ um 18-20% - etwas höhere ↓ in Wasserdampfa.	- Buche: ↓ um 37-47% - Esche: ↓ um 44-48% - Fichte: ↓ um 24-35% - höhere Abnahme in Stickstoffa.	- E-Modul bleibt annähernd gleich - Biegefestigkeit: - Buche: ↓ um 30-39% - Esche: ↓ um 33-36% - Fichte: ↓ um 25-28%	

r.L.= relative Luftfeuchte

atro= absolut trocken (auf Holz bezogen)

↓= Abnahme

↑= Zunahme

Infolge dieser Ergebnisse werden derzeit verschiedene Verfahrensparameter geändert. Das unter diesen Bedingungen behandelte Holz wird erneut untersucht und die Ergebnisse mit denen der ersten Behandlungsstufe verglichen. Diese Arbeiten stehen noch aus, so dass in diesem Bericht noch keine endgültigen Resultate genannt werden können.

Anwendungsforschung und weitere Entwicklungen: Auch wurden Arbeiten vor dem Hintergrund konkreter Anwendungen durchgeführt. So beschäftigte sich Pfriem (2006) mit der Eignung thermisch modifizierter Hölzer für die Anwendung im Musikinstrumentenbau mit besonderer Betrachtung des Feuchteverhaltens. Untersuchte Einsatzfelder waren Resonanzkörper am Beispiel der Fichte sowie Blas- und Durchschlagzungeninstrumente am Beispiel von Ahorn. Aus den gewonnenen Ergebnissen schlussfolgerte er einen möglichen Einsatz von thermisch modifiziertem Holz als Ersatz für Tropenhölzer. Geeignete

Einsatzgebiete sind die Restauration alter Instrumente, Musikinstrumente, die eine hohe Dimensionsstabilität und geringe Feuchteaufnahme benötigen sowie Musikinstrumente mit der Forderung besserer Klangeigenschaften. Scheiding et al. (2007) wiederum führten Untersuchungen an thermisch modifiziertem Holz aus Kiefer, Fichte, Buche und Esche für Holzspielplätze durch. Das Material wurde industriell von neun verschiedenen Herstellern bezogen, hergestellt nach drei Verfahren und mechanischen Prüfungen sowie einer Dauerhaftigkeitsprüfung unterzogen. Die Resistenz des vergüteten Holzes erhöhte sich gegenüber allen Pilzen, obwohl auch hier beobachtet wurde, dass der Weissfäulepilz *Poria placenta* eine höhere Abbaurate bei Fichte und Kiefer zeigt als die Braunfäulevertreter *Coniophora puteana* und *Gloeophyllum trabeum*. Hervorzuheben sind Esche und Buche, die gegenüber Basidiomyceten so geringe Masseverluste aufwiesen, dass eine Zuordnung in Dauerhaftigkeitsklasse 1 und 2 möglich war. Gegenüber Moderfäule waren die Thernadelhölzer im Durchschnitt mässig dauerhaft, Esche dauerhaft und Buche sogar sehr dauerhaft. Wie bei anderen Untersuchungen wurde eine Abnahme der Festigkeit und Zunahme der Sprödigkeit ermittelt. Die Autoren schlussfolgerten, dass eine Verwendung für Spielplatzgeräte prinzipiell möglich ist, raten jedoch dazu bei tragenden Bauteilen einen Verwendbarkeitsnachweis zu beantragen. Erste Referenzobjekte wurden bereits vom Spielplatzgerätehersteller ABC Team und Sport Gerlach in die Tat umgesetzt.

Thermisch modifiziertes Holz gelang in den 1990er Jahren schliesslich zur industriellen Reife und wird mittlerweile von zahlreichen Firmen angeboten. An wissenschaftlichen Untersuchungen beteiligt sind in der Schweiz vor allem die ETH Zürich, die EPF Lausanne und die Empa. Seit 2007 können sich Firmen mit dem „Qualitätszeichen TMT“ ihr Produkt durch das Entwicklungs- und Prüflabor Holztechnologie (EPH) in Dresden zertifizieren lassen. An der Herausgabe einer Norm wird gearbeitet. Ein Schritt in diese Richtung ist die seit 2007 existierende technische Spezifikation CEN/TS 15679, in der Thermoholz als thermally modified timber, kurz TMT bezeichnet wird. Einen Aufwärtstrend verzeichnet derzeit vor allem der Ersatz von Althölzern und die spezielle Behandlung der Oberfläche zur Erzeugung bestimmter Effekte. Die Timura Holzmanufaktur GmbH setzt mit ihren Produktlinien „Modern“ auf strukturgehobelte Oberflächen, die zusätzlich zur Betonung der Jahrringe mit einer Farbgebung versehen werden können. Öffentlich zugängliche Praxisbeispiele sind am Flughafen Zürich-Kloten aus Thermoholz bestehende Mittelträger der Sitzreihen und Bordschalter.



Abb. 3-36: Thermoholz am Flughafen Kloten-Zürich (Unique, Ralph Berisberg)

3.4 Zusatzdienstleistungen und Koppelprodukte

Kapitel 3.4 entstand in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. A. Hurst der BFH-AHB Biel und ist dem Bericht:

Krackler V., Hurst A., Keunecke D., Niemz P. (2010). Untersuchungen zur Verwertung von bei Laubholz anfallenden Holzresten. Abschlussbericht. Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2008.10.

entnommen.

Zum Einschnitt unbrauchbare Sortimente lassen sich auch stofflich, chemisch oder energetisch verwerten. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über konkrete Anwendungen in den drei Teilbereichen.

3.4.1 Stoffliche Verwertung neben Holzwerkstoffen

Unter stofflicher Verwertung wird die Nutzung der anfallenden Sägenebenprodukte sowie des nicht einschneidbaren Industrieholzes und deren Verarbeitung zu Produkten unterschiedlichster Art verstanden. Natürlich fallen darunter auch Span- und Faserwerkstoffe. Jedoch existieren daneben noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten, bei der das Restholz nicht zu einem eigenständigen Werkstoff verwandelt, sondern mitunter bestimmten Produkten nur beigemischt oder direkt für diverse Zwecke genutzt wird.

Lebensmittelherstellung

Anzucht von Speisepilzen: In Asien werden essbare Pilze seit 2000 Jahren auf Holz gezüchtet. Besonders mit dem Shii-take Pilz wird so eine weitere Nahrungsquelle geschaffen. Hierzulande werden auf diese Weise u.a. Champignons, verschiedene Seitlinge, Stockschwämmchen oder Birkenporlinge kultiviert. Früher wurden dazu Ast- und Stammscheiben angebohrt und dem mit entsprechenden Mycel beimpft.

Diese Methode wird jedoch heute nur noch von Hobbyzüchtern angewandt. Für die Produktion grösserer Mengen wird gegenwärtig mit Schüttsubstraten gearbeitet. Diese bestehen aus Sägemehl mit verschiedenen Zuschlagstoffen und befinden sich in Kunststoffsäcken, in denen die entsprechenden Pilze kultiviert werden. Der Durchmesser der Holzpartikel sollte nicht kleiner als 0,85 mm sein, da eine gute Belüftung besonders entscheidend für das Wachstum ist. Vor allem Hartlaubhölzer wie Eiche oder Buche werden genutzt. Das mag daran liegen, dass viele essbare Pilze Weissfäuleerreger sind und damit Laubhölzer bevorzugen. Erst wenige Pilzarten werden kommerziell genutzt, so dass dieser Bereich weiter ausgebaut werden könnte. Neben dem breiteren Pilzangebot und -genuss wäre dies eine Möglichkeit anfallende Sägemehlreste aus Laubholz sinnvoll zu nutzen.

Räucherholz: Räuchern ist eine Konservierungsmethode, um Fleisch, Fleischerzeugnisse und Fisch durch die Verschwelung von Hölzern haltbar zu machen. Geeignet sind dafür die Hartlaubhölzer Eiche, Buche, Erle, Ahorn und Wacholder, die in Form von gespaltenem Holz, Säge- und Hobelspänen keimtötend und austrocknend auf das Räuchergut wirken. Für den Räucherprozess bieten sich für den Hausgebrauch kleinere Räucheröfen oder bei grössere Mengen Räucherschrank oder -kammern an.

Weinherstellung: Für die Geschmacksgebung und Lagerung von Weinen werde diese in Fässern gelagert, die, neben einigen regionalen Ausnahmen, beinahe ausschliesslich aus Eiche sind. Die Geschichte des Weinfasses geht bis in die Keltenzeit zurück, das Weinfass war bis in die Neuzeit hinein nicht nur Lager- sondern auch Transportgefäss. Die Grösse der Fässer reicht von 136 bis zu 1200 Liter. In Europa wird vor allem Trauben- und Stieleiche verwendet, in Nordamerika zudem Weisseiche. Der Weg zu einem guten Fass für aromatische Zwecke ist relativ lang. Die sogenannten Dauben (=Längshölzer, aus denen das Fass zusammengesetzt wird) werden zunächst für 24 – 36 Monate im Freien getrocknet, was neben der leichten Senkung des Extraktstoffgehaltes vor allem zu einer Verstärkung des aromatischen Potentials führt. Anschliessend werden die Dauben „getoastet“ oder geröstet, um zum einen das Holz in die Bogenform zu bringen und zum anderen aromatische Verbindungen freizusetzen. Diese entstehen, da Fragmente des Lignins und der Polysaccharide thermisch abgebaut werden. Zusätzlich zu diesen Verbindungen wirken auch Polyphenole des Holzes, besonders die das Eichenholz auszeichnenden hydrolysierbaren Gerbstoffe, als Geschmacksintensivierer, da der Wein sie dem Fass entzieht. Die Menge an aromatischen Verbindungen kann über die Dauer und Temperatur der thermischen Behandlung gesteuert werden.

Seit einiger Zeit werden für die Aromaentwicklung bestimmter Weine nicht mehr nur Fässer, sondern auch einzelne Dauben, feines Pulver oder Chips aus Eiche verwendet, welche meist Reste der Daubenherstellung sind. Diese werden direkt der Maische oder bereits ausgelaugten Fässern zugegeben. Vorteil dieser Methode ist neben der längeren Nutzungsdauer der Fässer, eine höhere Ausbeute an Wein. 200.000 Liter stehen 3350 Litern Wein gegenüber bei einem Kubikmeter Chips oder fünf Fässern aus der gleichen Menge Holz (Makowski 2003). Grund dafür sind die hohen Qualitätsanforderungen an das Holz und ein aufwendiger Herstellungsprozess. Weiterhin ist die Lagerung mit Chips weniger zeitintensiv und sie sind um ein deutliches günstiger, was sich auch im Flaschenpreis widerspiegelt. Besonders zweckmässig ist dieses Verfahren für leichte Rotweine, da eine direkte Lagerung im Fass zu einem zu starken Holzgeschmack führen kann. Bei dichten und hochwertigen Weinen dagegen eignet sich hervorragend der herkömmliche Weg, da nur diese den hohen Gerbstoffanteil vertragen, so dass diese Tradition keine Gefahr läuft auszusterben.

Eine Schweizer Firma, die noch Eichenfässer produziert ist die Käferei Suppiger GmbH in Küsnacht am Rigi, die ausschliesslich Holz aus Schweizer Wäldern einsetzt. Hochwertige Eichenchips werden u.a. von dem deutschen Unternehmen J. Rettenmaier & Söhne GmbH+CO.KG aus Stieleichen höchster Qualität vertrieben. Die Weinproduktion stellt auf jeden Fall eine Möglichkeit der Eichennutzung dar, jedoch nur für kleine, hochwertige Sortimente und ist daher nicht für die Resteverwertung geeignet.

Verwendung als Filtermaterial: Sägespäne und Sägemehl können mitunter im Umweltschutz eingesetzt werden, um Materialien zu kompostieren oder zu filtern. Zur Kompostierung von Klärschlamm dienen Holzreste als Strukturmaterial. Mit durch Bernsteinsäure verestertem Fichtenmehl war es nach der Aktivierung mit Natriumhydrogencarbonat möglich, Cadmium aus dem Wasser zu entfernen. (Marchetti et al. 2000). Šćiban und Klačnja (2004) untersuchten das Potential von Pappel-, Weiden-, Tannen-, Eichen- und Robinienholzmehl zum Entfernen von toxischen Schwermetallionen aus wässrigen Lösungen. Alle Holzarten erwiesen sich als geeignet, allerdings zeigten Eiche und Robinie eine höhere Filterrate als die restlichen drei. Sie konnten die untersuchten Schwermetalle in folgender Reihenfolge adsorbieren: Kupfer > Nickel > Zink > Cadmium.

Werkstoffe aus Holzmehl und Holzspänen

Zuschlagstoff zu Kunststoffen: Hauptgrund für die Zugabe von Zuschlagstoffen ist das Herabsetzen der Herstellungskosten, da die Kunststoffe mit einem günstigeren Rohstoff gestreckt werden können. Als sogenannte Füllmittel dienen Calciumcarbonat (Kalk), Kohlenstoffe (Grafit, Russ), Silikate (Feldspat, Talk) oder auch Holzmehl. Es ist keine Neuheit, Füllstoffe in Kunststoffen zu verwenden, allerdings ist Holzmehl im Gegensatz zu den drei restlich genannten eine kostengünstigere Alternative, die zudem aus nachwachsenden Rohstoffen stammt und als Nebenprodukt in der Holzverarbeitenden Industrie anfällt. Unterschied zu WPC (Wood-Plastic-Composites) ist, dass hier mittlerweile vorherrschend Holzfasern eingesetzt werden, die nicht mehr nur eine Füllfunktion erfüllen, sondern den Kunststoff verstärken und damit ein eigenes Produkt bilden. Zudem wird in WPCs meist mit höheren Holzanteilen gearbeitet, kann in Kunststoffen jedoch auch einen Anteil bis 70 % ausmachen. Erste Kunststoffe mit Holzmehl gehen auf das Jahr 1855/56 zurück, als Francois Charles Lepage das Latrysche Holz (oder auch Bois Durci genannt) erfand, was mit Holzmehl und weiteren Zuschlagstoffen vermengtes Blut-Albumin von Tieren ist und unter Hitze und Druck in Formen gepresst wird. Bald darauf folgten weitere Kunststoffe wie das Celluloid (1869), Galalith (1899), Bakelit (1907), Nylon, Perlon, Polystyrol, Teflon und schliesslich 1956 Polyethylen und Polypropylen.

Viele von den genannten Kunststoffen werden heute noch gefertigt. Selbst Bakelit, der erstmalig industriell hergestellte duromere Kunststoff auf der Basis von Phenolharz, wird heute noch in der Elektroindustrie für Leiterplatten oder thermisch und mechanisch hoch belastete Bauteile wie Schleifkörper und Bremsbeläge eingesetzt. Der damalige Erfinder Leo Hendrik Baekeland setzte von Anfang an Sägemehl als Füllmittel ein. Meist werden Nadelhölzer oder Pappel eingesetzt, für dunkel gefärbte Bakeliterzeugnisse eignet sich besonders Buchenholzmehl (Vorreiter 1960).

Linoleum: Linoleum ist ein Bodenbelag, mit dem die verschiedensten Oberflächenmuster simuliert werden können. Die Erfindung aus dem Jahre 1860 geht auf den englischen Chemiker Frederick Walton zurück, der den Namen aus den beiden lateinischen Begriffen linum „Lein“ und oleum „Öl“ ableitete und damit auf einen der wichtigsten Grundstoffe hinwies (Leinöl). Beeindruckend an diesem Produkt ist, dass es ausschliesslich aus reinen Naturstoffen besteht. Neben Leinenöl, heutzutage ersatzweise auch Sojaöl, setzt sich Linoleum aus Naturharzen (Kolophonium, Copal und ersatzweise Dammar), Kalksteinpulver, Titan(IV)-oxid als Weisspigment, Farbstoffen, Jutegewebe als Trägerschicht sowie Kork- und/ oder Holzmehl zusammen. Der Anteil an Holzmehl kann immerhin bis zu 60 % betragen. Etwa 40 % fallen auf das Linoxin und die Harze, die in Form von Linoleumzement als Bindemittel wirken. Das Jutegewebe als Trägermaterial macht gerade einmal 1 % aus. Nachteilig ist der hohe Zeit- und Arbeitsaufwand, da die Herstellung des Bodenbelages in einem mehrstufigen Verfahren erfolgt. Geliefert werden kann Linoleum in Form von Platten oder als Rollen.

Zusammensetzung und die technischen Eigenschaften sind in Europa in der DIN EN 548 (2004) „Elastische Bodenbeläge - Spezifikation für Linoleum mit und ohne Muster“ genormt. In der Schweiz sind Anforderungen zudem in der SIA 253 (2002) „Bodenbeläge aus Linoleum, Kunststoff, Gummi, Kork, Textilien und Holz“ aufgeführt. Linoleum hat viele sehr gute Eigenschaften und ist ideal für das Wohnen mit Kindern geeignet. Hervorragend ist seine Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Beanspruchungen. Weiterhin zeichnen ihn Antistatik, schwere Entflammbarkeit, Zigarettenglut-Beständigkeit, eine leichte pilztötende und bakterienhemmende Wirkung sowie Reinigungsfreundlichkeit aus. Ungeeignet ist er für Bad, WC oder Waschraum, da Linoleum keine ständige Nässe verträgt.

Bis in die 1960er Jahre überwog Linoleum unter den elastischen Bodenbelägen. Zu dieser Zeit entfiel die Hälfte des Holzmehlverbrauchs auf dessen Produktion. Ab 1960 wurde er mehr und mehr durch PVC-Beläge verdrängt, erfreut sich in den letzten Jahren jedoch wieder steigender Beliebtheit.

Iwood: Iwood (Abb. 3-37) ist eine Erfindung der Schweizer Firma innovation wood. Dabei handelt es sich um einen Holzwerkstoff, der aus den Resten der Sägeindustrie gewonnen wird. Sägemehl, Sägespäne und Holzstaub werden mit Wasser und Stärke zu einer Paste, ähnlich einem Brotteig, verrührt. Anschliessend wird diese Holzpaste mit Hilfe von Hefepilzen, Bakterien oder rein mechanisch geschäumt und getrocknet. Ergebnis ist ein poröser Werkstoff mit sehr geringen Dichten um die 250 bis 300 kg/m³, guten Festigkeitswerten und einer Bearbeitbarkeit wie Holz. Eingesetzt werden kann der Werkstoff als statisch beanspruchter Kern einer Holzverbundplatte im Möbel- oder Türenbau oder als ökologisches Dämm- und Füllmaterial. Folgende positive Eigenschaften nennt die Firma für ihr Produkt:

- ◆ Herstellung aus Holzstaub und –spänen
- ◆ Fertigung als Platte oder Formteil
- ◆ Produktion rein biologisch ohne schädliche Zuschlagstoffe
- ◆ ohne Leim (und damit Formaldehyd)
- ◆ angenehmes Gefühl in den Händen
- ◆ Herstellung bereits heute in kleinen Mengen im Labor
- ◆ geeignete Einsatzbereiche sind Formteilbau, Möbel- und Hausbau
- ◆ Bearbeitung durch Maschinen der Holzverarbeitung möglich
- ◆ Leicht, fest, formstabil, gute Wärmedämmeigenschaften
- ◆ ökologische Entsorgung bedenkenlos möglich
- ◆ Sparen von Ressourcen

Iwood wird derzeit nur in kleinen Mengen im Labormassstab hergestellt. An der Weiterentwicklung von iwood arbeitet die Firma zusammen mit der Hochschule für Architektur, Bau und Holz (BFH-AHB) Biel, der ETH Zürich und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau Wädenswil (FAW). Interessant ist iwood vor allem, da es auch problemlos aus Laubholresten hergestellt werden kann. Nach Angaben der Firma fehlen für einen industriellen Prozess leider noch die Industriepartner und Risikokapitalgeber (Affentranger 2009). Iwood ist ein ideales Beispiel für die angestrebte Kaskadennutzung. Zum einen dient es der sinnvollen Restholzverwertung, aus dem ein ökologischer Werkstoff entsteht, der bis zum Versagen als Baumaterial eingesetzt wird. Zudem kann iwood nach Ablauf der Nutzungsdauer durch ein Wasserbad gelöst und im Gegensatz zu mit Leimen ausgestatteten Holzwerkstoffen zu Brennpellets verarbeitet werden. An Altmöbeln gemessen würde dies eine Einsparung von 90 % Sondermüll bedeuten.



Abb. 3-37: Iwood (Verena Krackler)

Celenio: Hinter dem Namen Celenio verbirgt sich ein von der Hamberger Flooring GmbH & Co. KG entwickelter Bodenbelag der besonderen Art. Er wird aus Harolith® gefertigt, ein Gemisch aus 95 % Holzspänen, Kunstharzen und Farbpigmenten. Nach Vermengen der Grundsubstanzen werden unter hohem Druck Bodenfliesen gepresst. Das Besondere an ihnen ist die dreidimensionale Oberfläche in Stein-, Schiffer- und Lederoptik. Auf Nachfrage beim Unternehmen wird für Harolith® im Moment nur Nadelholz eingesetzt, eine etwaige Prüfung der von Laubholz wird jedoch nicht ausgeschlossen (Gathen von der 2009).

Weitere Verwendungen: Auf zahlreiche weitere Verwertungsmöglichkeiten von Holzmehl ging vor allem Leopold Vorreiter in seinen beiden Werken „Handbuch für Holzabfallwirtschaft“ (1943) und „Holzmehl - Eigenschaften Erzeugung und Verwendung“ (1960) ein, die er zudem detailliert erläutert. Dazu gehören:

Tab. 3-16: Verwertungsmöglichkeiten für Holzmehl (Vorreiter 1943; Vorreiter 1960)

A - K	L - S	T - W
Aktivkohle	Lignogener Kunststoff	Tapetenstreu
Backstreichmittel	Linoleum	Treibstoff
Filterpapier	Leimstreckmittel	Trockenmittel
Füllmittel für Batterien	Papier- und Pappenfüllmittel	Überzug- und Klebmassen
Futterstreckmittel	Plastisches Holz	Verbandstoffe
Holzstein (Xyolith)	Putz- und Poliermittel	Waschseife
Kehrmittel	<i>Saugmittel für Spreng- und Zündstoff</i>	
<i>Kunstharzpressmassen</i>	Schleifscheiben	
Kunstholz		

- Verwertungsoptionen, bei denen Vorreiter Nadelhölzer oder keine Holzart als Rohstoffgrundlage nennt

- Verwertungsoptionen, bei denen Vorreiter Nadelhölzer und z.T. Laubhölzer (meist Pappel, bei Kunstharzpressmassen unter Umständen auch Buche) als Rohstoffgrundlage nennt

- Verwertungsoptionen, bei denen Vorreiter ausschliesslich Hartlaubhölzer als Rohstoffgrundlage nennt

Holzwolle und Holzwolle-Platten (HWL-Platten)

Die erste Maschine zur Herstellung von Holzwolle wurde 1885 patentiert. Es ist ein Industrieholzprodukt, das aus Rundholzabschnitten und Schwartenstücken gewonnen wird. Das Holz wird dazu in 50 cm lange Stücke abgelängt, entrindet und zur Trocknung mehrere Monate gelagert. Anschliessend schneiden abwechselnd kammförmig angeordnete Messer Rillen in das Holz. Diese Oberfläche wird behobelt, woraus die typischen Fadenspäne entstehen, die in der Breite und Stärke variieren können. In erster Linie wird Fichtenholz, je nach Verwendungszweck auch Kiefer, Pappel oder Linde eingesetzt. Aufgrund seiner Naturbelassenheit eignet sich Holzwolle wunderbar als Verpackungsmaterial. Besonders ISO-zertifizierte Industrie- und Gewerbebetriebe sind verpflichtet, umweltschonende Verpackungsmaterialien zu verwenden und greifen daher vielfach auf Holzwolle zurück. Zweckmässig sind die Späne ausserdem als Anzündhilfe, Unterlage in der Erdbeerernte sowie als Einstreu für Tiere.

Wird die Holzwolle mit Magnesit, Zement oder Gips gebunden, spricht man von Holzwolle-Platten (HWL-Platten), früher Holzwolle-Leichtbauplatten, die zumeist als Dämmstoff zur Wärme- und Schalldämmung eingesetzt werden. Diese kamen erstmalig 1926 in Gebrauch und waren die ersten technisch hergestellten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, in denen Holzwolle mit Magnesit gebunden wurde. Später folgten zudem zementgebundene HWL-Platten. Wegen ihres Aussehens werden die Platten oft auch scherzhaft Sauerkrautplatten genannt. Ein weiteres bekanntes Synonym ist Heraklith, hinter dem sich die ehemalige österreichische Firma verbirgt, die seit 2006 zur deutschen Firma Knauf Gips

gehört und seit 2007 unter dem gemeinsamen Namen Knauf Insulation GmbH auftreten und solche organisch gebundenen Platten in unterschiedlichen Ausführungen anbieten. Enormer Vorteil dieser Platten ist, dass sie keine künstlichen Bindemittel oder Schadstoffe enthalten und somit sehr ökologisch sind. Vor allem in der Schweiz fällt die Nutzung als Deckenplatten ohne Putzauftrag in öffentlichen Gebäuden (Bsp. Hauptbahnhof Zürich) auf, da sie aufgrund der offenen Porenstruktur als ideale Schallabsorber wirken. Weiterhin besitzen die Platten gute Brandschutzeigenschaften. Etwas schlechter gegenüber Dämmstoffen wie Mineralwolle oder Schaumkunststoffen ist die Wärmedämmfähigkeit. Dem wird mit Holzwolle-Mehrschichtplatten entgegengewirkt, die einen Kern aus Mineralwolle oder Polystyrol besitzen und mit einer ein- oder beidseitigen Deckschicht zementgebundener Holzwolle beplankt sind. Neben der besseren Wärmedämmung können Holzwolle-Mehrschichtplatten ohne Putz auch dekorativ wirken und daher im Innenbereich als Gestaltungsmittel eingesetzt werden. Wie bereits erwähnt werden für Holzwolle-Platten überwiegend Nadelhölzer eingesetzt. Das hängt wie bei den mineralgebundenen Spanplatten (siehe Abschnitt 3.2.3) mit bestimmten wasserlöslichen Extraktstoffen zusammen, die vor allem bei Zement die Abbindung dessen verzögern. Eine Beimischung von Buchenholzwolle zu gips- und magnesitgebundenen Platten in Anteilen bis zu 50 % ist nach Kollmann (1940) unproblematischer und wurde zu damaligen Zeiten auch schon in grösseren Mengen durchgeführt. Mittlerweile ist bekannt, dass durch verschiedene Methoden die Abbindung mineralgebundener Spanplatten aus „ungeeigneten“ Hölzern verbessert werden kann, so dass davon auszugehen ist, dass dies auch auf HWL-Platten zutrifft.

Hackschnitzel als Bodenmaterial

Hackschnitzel sind ein ideales Material für die Beet- und Bodenabdeckungen an Lärmschutzwällen, Strassenböschungen, Wegen und Spielplätzen. Pferden bieten sie einen angenehmen Boden für den Auslauf, weiterhin können sie als Erosionsschutz oder zum Mulchen von Pflanzflächen in Industrieanlagen eingesetzt werden.

3.4.2 Chemische Holzverwertung

Es zählen all jene Verfahren zur chemischen Holzverwertung, bei denen durch Aufschluss gezielt bestimmte Bestandteile aus dem Holz herausgelöst werden, um daraus spezielle Produkte herzustellen. Seit jeher spielt hierbei die Zellstoff- und Papiererzeugung die bedeutendste Rolle. Einige Produkte werden nicht mehr oder nur noch in kleinen Mengen hergestellt, andere wiederum sind aufgrund des Wandels der Zeit gerade in Entwicklung.

Holzstoff

Unter Holzstoff werden Fasermassen verstanden, die meist auf mechanischem Wege hergestellt werden. Verwendung findet Holzstoff bei der Herstellung von Papier, Pappe, Pappgussformteilen oder künstlichem Holz. Ausgangsrohstoffe sind Rundhölzer oder Hackschnitzel. Daher wird Holz- und Hackschnitzelschliff unterschieden. Technisch genutzt werden die Fasern, deren Anteil bei Nadelhölzern bei 90 % und bei Laubhölzern bei ca. 66 % liegt.

Die Zerkleinerung beim Holzschliff erfolgt mittels sogenannter Schleifersteine aus keramik- oder zementgebundenen Elementen, dessen Schleifkörner aus Korund oder Quarz bestehen (=Steinschliff). Je nach Vorbehandlung des Holzes wird der Steinschliff unterteilt in Weiss- und Braunschliff sowie chemischen Holzschliff. Pappel eignet für alle drei Schliffarten;

Fichte, Tanne und Kiefer vor allem für den Weisschliff; Buche für den Braunschliff. Im Jahr 2007 betrug die Menge an Holzschliff in der Schweiz 135.000 t.

Beim Refinerschliff erfolgt die Zerfaserung der Hackschnitzel mittels rotierender profilierter Mahlscheiben. Die Herstellungsarten Refiner-Holzstoff, thermomechanischer Holzstoff und chemisch-mechanischer Holzstoff werden unterschieden. Es können sowohl Nadel- als auch Laubhölzer eingesetzt werden.



Abb. 3-38: Schliffarten, links: Holzschliff, rechts: Hackschnitzelschliff (Gutwasser 2005)

Zellstoffherstellung

Zellstoff ist wie Holzstoff eins der Ausgangsmaterialien für die Papierherstellung. Papiere aus Holzstoff wurden jedoch aufgrund des hohen Ligningehalts schnell brüchig und verfärbten sich gelb. Durch die Erfindung des Natron-, Sulfit- und Sulfatzellstoffs Ende des 19. Jhd. gelang es, das Lignin herauszulösen und die Cellulose freizulegen. Nach weiterer Modifizierung war es zudem möglich, neben Fichte und Tanne auch Kiefer und Laubhölzer wie Buche einzusetzen. Heutzutage wird der überwiegende Teil des Zellstoffs aus nicht einheimischen Plantagenhölzern wie Eukalyptus gewonnen. Infolgedessen wird viel Zellstoff importiert, da die Transportkosten meist unter den Produktionskosten liegen. Buchenzellstoff ist dadurch mitunter nicht mehr wettbewerbsfähig. Der Schweizer Zellstoffhersteller Borregaard Schweiz AG, eine Niederlassung der norwegischen Borregaard, musste im September 2008 sein Werk schliessen, da sich die Produktion wegen deutlich gestiegener Energiepreise und starker Preis- und Absatzeinbrüche nicht mehr rentierte. Mit einer Verarbeitungsmenge von 600.000 m³ Nadelholz und 100.000 m³ Laubholz war Borregard einer der bedeutendsten Industrieholzabnehmer.

Zur Herstellung von Zellstoff dienen als Ausgangsrohstoffe ca. 75 % Nadelholz, 20 % Laubholz und 5 % Einjahrespflanzen. Die Unterschiede im anatomischen Aufbau von Nadel- und Laubhölzern beeinflussen massgeblich die Eigenschaften des Zellstoffes. Nadelhölzer liefern lang- und Laubhölzer kurzfasrigen Zellstoff. Übliche Herstellungsverfahren sind das alkalische Sulfat- und das saure Sulfitverfahren. Ungefähr 95 % der heutigen Weltproduktion werden nach dem Sulfatverfahren hergestellt. Zudem existieren mittlerweile zahlreiche weitere alternative Methoden (ASAM-, Alcell-, Acetosolv-, Acetocell-, Formacell-, Alkanolamin-, Milox- und Natural Pulping-Verfahren, Quantum-Prozess).

Zu Beginn der Zellstoffproduktion wurden ausschliesslich Nadelhölzer eingesetzt. Der Gründer der Cellulosefabrik Attisholz Dr. Benjamin Sieber bewies jedoch bereits in den 1920er Jahren, dass sich ausser der Eiche beinahe alle Laubhölzer chemisch aufschliessen lassen. Die Buche, deren Zellstoff seit 1935 grosstechnisch in Attisholz erzeugt wurde, hat sich letztlich praktisch durchgesetzt. Konkurrenzfähig, besonders zum führenden Zellstoffhersteller Deutschland, wurde der Zellstoff erst 1959, als die Forstabteilung der ETH beschloss, Buchenholz direkt der chemischen Weiterverarbeitung zuzuführen. Trotz einiger

morphologischer Eigenheiten der Buche verleiht der Zellstoff Papieren eine gute Opazität, bessere Saugfähigkeit und ein erhöhtes Volumen.

Papier-, Karton- und Pappeherstellung

Grundlage für Papier ist Holzstoff, Zellstoff oder Altpapier. Durch das Aufschwemmen der Materialien und Entwässern auf einem Sieb oder zwischen zwei Sieben entsteht ein Faservlies, welches anschliessend verdichtet und getrocknet wird. Papier, Karton und Pappe unterscheiden sich bezüglich ihres Flächengewichtes von $<250 \text{ g/m}^2$ (Papier), $250\text{-}600 \text{ g/m}^2$ (Karton) und $600\text{-}1000 \text{ g/m}^2$ (Pappe). Pappen schwerer als 1000 g/m^2 werden nicht mehr nach Gewicht, sondern nach Dicke in mm klassifiziert. Im Jahre 2008 wurden in der Schweiz ca. 1,77 Mio. Tonnen Papier, Karton und Pappe aus 1,4 Mio. Tonnen Faserstoffen produziert. Die Faserstoffe stammen zu 10 % aus Holzstoff, 37 % aus Zellstoff und 53 % aus Altpapier. Geeignet sind sowohl Nadel- als auch Laubhölzer. Die unterschiedlichen Fasern beeinflussen jedoch massgeblich die Eigenschaften der Papiere:



Abb. 3-39: Einfluss der Fasereigenschaften von Nadel- und Laubholz auf die Papiereigenschaften

Produkte aus Cellulose

Aus Cellulose lassen sich neben Zellstoff viele weitere Produkte herstellen. Dabei kann es mitunter sein, dass die Cellulose derart verändert wird, dass sie als solches nicht mehr erkennbar ist. Im Folgenden werden einige dieser Verfahren und Verwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

Dämmstoffe: Cellulose als Dämmstoff ist zwar kein Produkt zur Verwertung überschüssiger Holzreste, allerdings ist es ein optimales Beispiel für eine sinnvolle Kaskadennutzung. Ausgedientes Zeitungspapier wird mechanisch in mehreren Schritten zerkleinert und aufgefasernt. Die dabei entstehenden Celluloseflocken werden zur Erhöhung des Brandschutzes meist noch mit Bor oder Borsalzen ausgestattet werden und sind anschliessend direkt als Einblasdämmung verwendbar. Bei dieser Methode verfilzen sich die Fasern zu einem festen Vlies. Daneben kann Cellulose auch in Plattenform geliefert oder auf senkrechte Schalungen aufgespritzt werden. Der Dämmstoff zeichnet sich durch eine Vielzahl positiver Eigenschaften aus, wie z.B.: diffusionsoffen, feuchtigkeitsregulierend, schimmelbeständig, ungezieferresistent, gesundheitlich unbedenklich, ökologisch einwandfrei (Recyclingrohstoff), geringer Energieaufwand bei der Herstellung, nach Absaugung wiederverwendbar, deponiefähig, hohe Elastizität der Zelluloseplatten und keine erhöhte Brandgefahr.

Regeneratcellulose: 2-3 % der Zellstoffproduktion wird als reiner Chemiezellstoff weiterverarbeitet. Den mengenmässig grössten Bestandteil nimmt dabei die sogenannte Regeneratcellulose ein, aus der die verschiedensten Produkte in Form von Cellulosefasern (Viskose, Modal, Tencel), Folien, Membranen und Schwämme hergestellt werden können. Zur Herstellung der regenerierten Cellulose dienen verschiedene Verfahren wie das schon seit über 100 Jahren angewendete Viskose-, das neuere Carbat- sowie das Lyocellverfahren.

Cellulosefasern werden aufgrund ihres Ausgangsrohstoffes Holz auch „natürliche Kunstfasern“ genannt. Zur Herstellung dieser ist das Viskoseverfahren noch immer das Dominierende. Es gliedert sich in die Prozessschritte: Alkalisierung – Zerfasern – Vorreife – Sulfidierung – Lösen – Filtrieren – Nachreife – Spinnen. Die Cellulose wird hierbei in wässrige Natriumhydroxid-Lösung gelegt, wodurch Natroncellulose entsteht. Durch Umsetzen (=Derivatisierung) der Natroncellulose mit Schwefelkohlenstoff bildet sich Natriumxanthogenat, die mit Natronlauge gemischt eine gelbe, dickflüssige (viskose) Lösung ergibt. Nach Filtrierung und Reifeprozess wird die Spinnlösung zu Fasern oder mit entsprechenden Düsen zu Folien geformt, deren Teilchen jedoch noch fein verteilt sind. Die Aufhebung dieses Zustandes erfolgt in einem schwefelsauren und salzhaltigen Fällbad. Nach diesen Verfahren hergestellte Fasern weisen hervorragende Eigenschaften auf, angepasst auf den jeweiligen Verwendungszweck. Sogenannte Modalfasern sind nassfest und baumwollähnlich, andere Anwendungen sind u.a technische Garne für Hochleistungsreifen. Neben einigen Nadelhölzern ist aus mitteleuropäischen Breiten besonders die Buche dafür geeignet.

Das Carbatverfahren verläuft gleich den Prozessen des Viskoseverfahrens, einziger Unterschied ist die Derivatisierung mit Harnstoff anstatt mit Schwefelkohlenstoff, was sehr viel umweltfreundlicher ist. Der benötigte Schwefelkohlenstoff des Viskoseverfahrens ist toxisch, zudem bildet er sich während des Verfahrens wieder zurück. Daneben entsteht zusätzlich der äusserst giftige Schwefelwasserstoff. Weitere Vorteile des Carbatverfahrens sind das Auflösen und Spinnen in einem Arbeitsgang sowie die Lagerungsfähigkeit des Zwischenproduktes Cellulosecarbat bis zu einem Jahr ohne Qualitätsverluste. Grosstechnisch kommt diese Methode noch nicht zur Anwendung, jedoch wurde nachgewiesen, dass die Verarbeitung auf Viskosespinnmaschinen problemlos möglich ist (Fink et al. 2009).

Beim Lyocellverfahren kann der Zellstoff direkt und unverändert ohne vorherige Derivatisierung aufgelöst werden. Das dabei eingesetzte N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) ist kein Gefahrstoff und damit ungiftig. Lyocellfasern werden üblicherweise Tencelfasern genannt. Das hängt mit dem Kauf der Marke Tencel durch die österreichische Lenzing AG vom Konkurrenten Courtaulds zusammen, der den Bereich infolge mehrerer Eigentümerwechsel ausgliederte. Der Name Tencel genoss einen höheren Bekanntheitsgrad, so dass dieser mit übernommen wurde. Neben den Tencelfasern sind aus der Spinnlösung heraus auch Vliese und Blasfolien herstellbar.



Abb. 3-40: Im Lyocellverfahren hergestellter Vlies (Fink et al. 2009)

Derivate der Cellulose: Neben der Regeneratcellulose können aus Chemiezellstoff auch Derivate gewonnen werden, die in nahezu allen Bereichen des Alltags zu finden sind. Dazu gehören die Herstellung von Bauchemikalien, Sprengstoffen, Lebensmitteln, Farben, Lacken oder Kunststoffen. Besonders die Kunststoffe werden immer bedeutender. Sie gelten als Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder Biokunststoffe und sind damit unabhängig von fossilen Rohstoffen.

Für die Herstellung ist eine Aktivierung der Cellulose nötig. Diese erfolgt mit verschiedenen Stoffen, wodurch Derivate unterschiedlicher Qualität und mit verschiedenen Eigenschaftsprofilen entstehen. Zwei kommerziell bedeutungsvolle Derivate sind Celluloseester und -ether (Tab. 3-17 + Tab. 3-18):

Tab. 3-17: Formen und Anwendungen des Celluloseesters (Gutwasser 2005)

Beschreibung	Celluloseester			
	-acetat CA	-nitrat CN	-propionat CP	-acetobutyrat CA
Erzeugung	- Acetylierung mit Essigsäureanhydrid	- Veresterung mit Salpetersäure	- Veresterung mit Propionsäure	- Veresterung mit Essig- u. Buttersäure
Technische Produkte	<ul style="list-style-type: none"> - veraltet: → Cellon (unbrennbar, öl-, wasserfest) - zeitgemäss: → Acetat-Kunstseide (hohe Zug- und Wasserfestigkeit, → Acetat-Lacke → Kunststoff 	<ul style="list-style-type: none"> - veraltet: → CN-Kunstseide (feuergefährlich) → Schiessbaumwolle → Celluloid (erstes Kunstharz) - zeitgemäss: → CN-Lacke → Kunststoff 	- Verwendung meist als Kunststoff	
Bsp. Verwendungen	<ul style="list-style-type: none"> - Brillengestelle - Folien für Bildschirme und Displays - Schraubendrehergriffe 	<ul style="list-style-type: none"> - Rohstoff für Lacke und Membranen - Komponente für Explosivstoffe - Kämme, Haarschmuck 	<ul style="list-style-type: none"> - Brillengestelle - Kugelschreiber - Schraubendrehergriffe - Spielwaren 	<ul style="list-style-type: none"> - Griffbeschichtungen (z.B. Schweizer Offiziersmesser) - Kabelrohre - Automobilzubehör - Folien

Tab. 3-18: Formen und Anwendungen des Celluloseethers (Fink et al. 2009)

Beschreibung	Celluloseether		
	Caboxymethylcellulose CMC	Hydrxyethylcellulose HEC	Methylcellulose MC
Erzeugung	- Reaktion mit Monochloressigsäure	- Umsetzung Alkalicellulose mit Ethylenoxid	- Umsetzung Alkalicellulose mit Methylchlorid
Technische Produkte	- Herstellung je nach Verwendungszweck als Rein-CMC oder Roh-CMC	/	- weniger bedeutend, daher Herstellung meist als Mischether in Methylhydroxyethyl-u. Methylhydroxypropylcellulose
Bsp. Verwendungen	- Rein-CMC: Dichtungsmittel für Kosmetik und Pharmazie - Roh-CMC: Bohrhilfsmittel in der Erdöl-gewinnung	- u.a. in Dispersionsfarben zur Verhinderung des Verspritzens der Farbe beim Auftragen	- u.a. im Baustoffbereich als Additive für Fliesenkleber

Holzverzuckerung: Cellulose und Hemicellulosen des Holzes sind chemisch gesehen Polysaccharide (Mehrfachzucker). Gebildet werden sie aus Monosacchariden bzw. Einfachzuckern, die über glykosidische Bindungen miteinander gekoppelt werden. Bei Cellulose handelt es sich um Glukosebausteine, die Hemicellulosen setzen sich je nach Holzart aus Pentosanen oder Hexosanen zusammen. Der durchschnittliche Celluloseanteil vieler Hölzer liegt bei 43 % (Tab. 3-10), der der Hemicellulosen zwischen 20-30 %. Der folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus einem Cellulosemolekül:

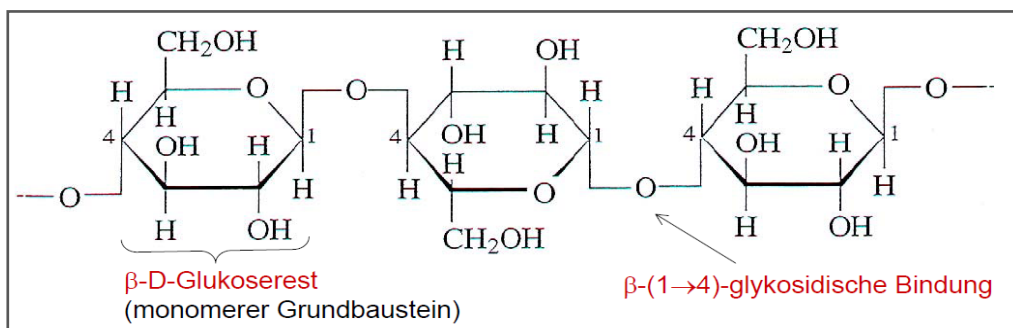


Abb. 3-41: Aufbau der Cellulose aus Glukoseeinheiten (Gutwasser 2005)

Bedeutend war die Gewinnung von Zucker aus Holz vor allem in Krisenzeiten für die Lebensmittel- und Futtermittelindustrie. Von der Entdeckung bis zur wirtschaftlichen Reife war es jedoch ein langer Weg. 1819 entdeckte der Franzose Braconnot die Möglichkeit der Zerlegung, es folgten unzählige Verfahrensvorschläge, von denen lediglich drei technische Bedeutung erlangten – das Scholler-Tornesch, das Bergius-Rheinau- und das Udic-Rheinau-Verfahren. Im Scholler-Tornesch-Prozess erfolgt die Umsetzung mit verdünnter Schwefelsäure unter hohen Drücken bis 1,0 MPa und Temperaturen bis 180 °C. Die Bergius-Rheinau- und Udic-Rheinau-Methode arbeiten mit konzentrierter Salpetersäure bei niedrigeren Drücken bis 0,1 MPa sowie Umgebungstemperatur. Je nach Verfahren lag der Zucker am Ende entweder als Lösung (Sirup) oder in kristalliner Form vor. Eingesetzt wurden zu damaliger Zeit sowohl Nadel- als auch Laubhölzer. Die Ausbeuten zeigten bei beiden nur geringe Unterschiede, wie

aus einer Tabelle in Sandermanns „Grundlagen der Chemie und der chemischen Technologie des Holzes“ hervorgeht:

Tab. 3-19: Ausbeuten nach dem Udic-Rheinau-Verfahren (Sandermann 1956)

Produkt	kg Ausbeute aus je 100 kg	
	Nadelholz	Laubholz
kristallisierter Traubenzucker	31	33
Futtermelasse mit 50 % Zucker	42	41
Sirup mit 60 % Zuckergehalt	14	14
Rheinau-Lignin	27	25

Im Gegensatz zu Regeneratcellulose bzw. zu den Derivaten ist der reine Holzzucker gegenwärtig nicht mehr von wirtschaftlicher Bedeutung, allerdings lässt sich dieser zu interessanten Produkten weiterverarbeiten, von denen einige immer stärker in das Interesse rücken. Aus der Zuckerlösung kann zum einen Furfurol gewonnen werden. Diese Flüssigkeit kann als Lösungsmittel oder als Ausgangsstoff zur Herstellung von Kunstharzen eingesetzt werden. Ein anderer Weg ist die Fermentation zu Milchsäuren, Fetten, Eiweißen, Essigsäure und Alkohol. Gerade dieser Alkohol wird immer wichtiger, da er in Form von Ethanol als Treibstoff fungieren kann. Näheres dazu wird im Abschnitt 3.4.3 „Holz als Energieträger“ erläutert.

Produkte aus Lignin

Neben der Cellulose und den Hemicellulosen besitzt das Holz noch einen dritten Hauptbestandteil. Das Lignin umhüllt die Cellulose und Hemicellulosen, dient damit als Kittsubstanz und ist der Grund für die hohe Druckbeanspruchbarkeit der Fasern. Für die Zellstoff- und Papierherstellung wird lediglich die Cellulose benötigt, das Lignin wird herausgelöst und ist damit ein Nebenprodukt. Dabei liegt es als Kraft-Lignin oder in Form von Lignosulfonsäuren in gelöstem Zustand vor und kann daraus extrahiert werden. Immerhin fallen jährlich weltweit ca. 50 Mio. Tonnen an (Kamm et al. 2006). Aufgrund negativer Eigenschaften wie dunkle Farbe und intensiver Geruch ist die Weiterverarbeitung von Lignin unpopulärer als die der Cellulose. Hinzu kommen anwendungstechnische Hemmnisse, fehlende Untersuchungen und mangelnde Entwicklungen. Über die Ligninverwertung wird schon seit Jahrzehnten nachgedacht. Sandermann (1956) sprach von einem „Sorgenkind“, da lediglich 0,5 % des Lignins technisch weiterverarbeitet wurden. Hauptverwendungszweck war die Verbrennung, obwohl 1600 Patente zur Ligninverwertung existierten. Keine schaffte jedoch einen wirtschaftlichen Durchbruch, obwohl die Menge je 1000 kg Fichten- oder Buchenholz nicht unerheblich ist – bis zu 400 kg. Im Vergleich dazu entstehen ebenso 400 kg an Cellulose.

Sandermann (1956) gab in seinem Buch schon damals einen umfangreichen Überblick. Je nach Aufschlussverfahren eignet sich Lignin neben der Verbrennung u.a. auch zur Produktion von Dünger, Aktivkohle, Füllmittel für Kautschuk, Klebstoff, Staubbindemittel, Alkohol oder Vanillin. Da jedoch einige der Vorschläge nicht industriell umsetzbar waren, erwies sich die Verwertung im Holzverband als bessere Variante, z.B. zur Herstellung von Bauplatten, Formkörpern oder Kunststoffen. Auch heute wird Lignin nur geringfügig und in der Hauptsache energetisch verwertet, da die Verarbeitung als Rohmaterial noch immer schwierig und damit weit entfernt von einer industriellen Nutzung ist. Das liegt zum einen an einer steigenden Wertschätzung der Lignocellulose (Nutzung von Cellulose und Lignin im Verbund). Hinderlich ist zum anderen die komplexe Struktur des Lignins und die damit

verbundene Inhomogenität, so dass eine genaue Aussage über definierte Eigenschaften schwierig ist. Eine Extrahierung aus den Ablaugen in der Zellstoffproduktion ist weiterhin sehr aufwendig, da diese zum Teil stark verunreinigt sind. Dennoch besitzt Lignin für einige Anwendungen ein hohes Potential, wie aus folgender Darstellung hervorgeht:

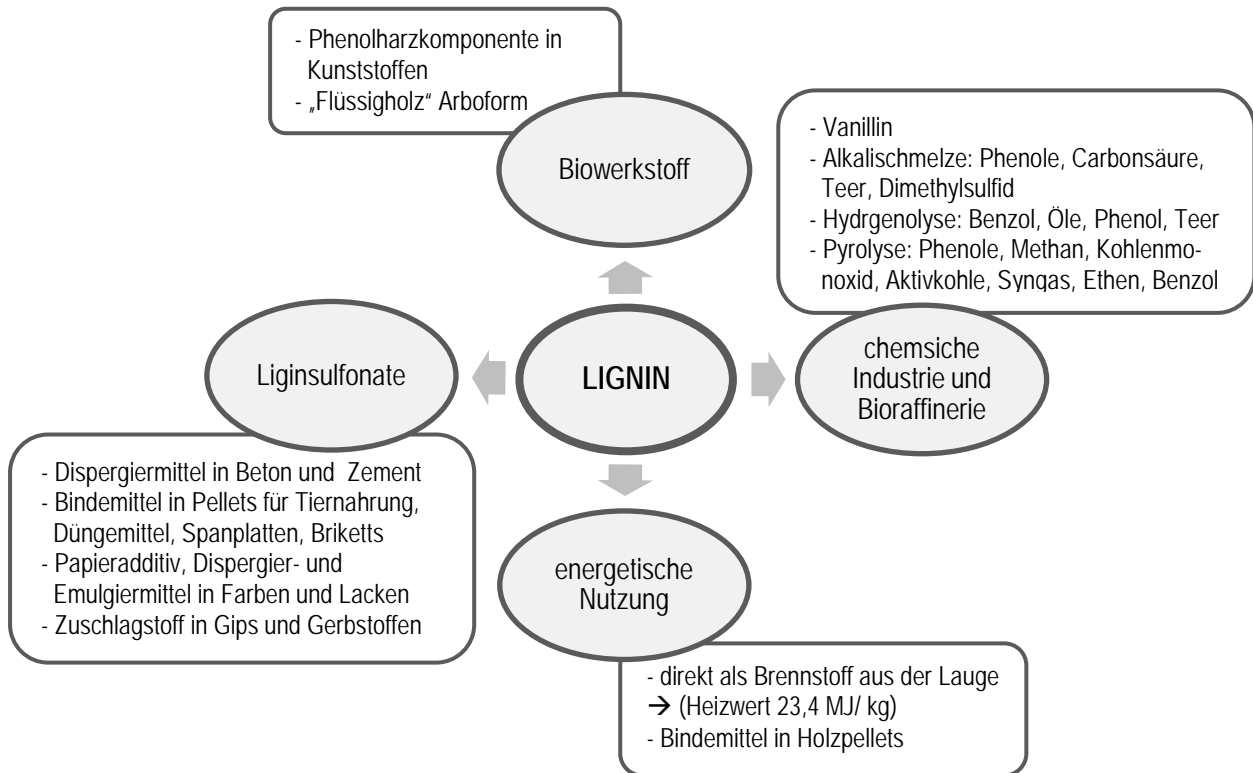


Abb. 3-42: Verwendung von Lignin (Kamm et al. 2006; Bozell et al. 2007)

Das Schweizer Unternehmen wez Kunststoffwerk AG entwickelte unter dem Namen „Greenline“ einen Biokunststoff, dessen Basis Lignin ist. Verarbeitet wird der Werkstoff mit konventioneller Spritzguss-Technologie aus dem Kunststoffbereich zu sortimentseigenen Produkten und technischen Teilen. Für die Bearbeitung eignen sich Werkzeuge für Polyolefine.

„Arboform“, entwickelt 1998 von der TECNARO GmbH in Deutschland, ist getrocknetes Lignin, das mit Naturfasern (Hanf, Flachs) und Additiven vermischt und anschließend unter einem Druck von bis zu 100 MPa bei Temperaturen bis zu 170 °C thermoplastisch verformt wird. Arboform wird auch als „Flüssigholz“ bezeichnet. Als reines Naturprodukt ist der Werkstoff frei von Erdöl, beliebig verformbar, problemlos recyclebar, physiologisch unbedenklich und frei von Schwermetallen mit sehr guten mechanischen Eigenschaften. Arboform kann für Musikinstrumente, Radiogehäuse, Autolenker, Armaturenbretter, Schmuck, Trägerformteile für Möbel und Spielwaren verwendet werden. Das Unternehmen Gucci nutzt Arboform zur Fertigung von Absätzen und Schuhsohlen (Anonymus 2009c).

3.4.3 Holz als Energieträger

Für minderwertige Sortimente und Holzreste aus der Sägeindustrie ist die Verwendung des Holzes als Energieträger eine sinnvolle Möglichkeit, wenn im Sinne der Kaskadennutzung die

stoffliche Verwertung ausgeschlossen ist. Anders als es im Moment vor allem bei Laubholz die Realität darstellt, sollte dies aber keine Allwecklösung für Stammholz der Qualitätsklassen B und C sein. Eine Studie (Thees und Lemm 2009) belegt, dass der Wald grössere Mengen an Energieholz bereitstellen könnte, wenn nicht genutzte oder im Wald zurückgelassene Sortimente einbezogen werden würden. Unter Beachtung dieses Aspekts bietet der Energieträger Holz nicht zu verachtende Vorteile: Unabhängigkeit von fossilen Ressourcen, ein nachwachsender Rohstoff, im Gegensatz zur Gewinnung von Energie aus Pflanzen der Landwirtschaft keine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion.

Verschiedene Verfahren werden angewendet, von denen einige bereits zu Beginn des 20. Jhd. entwickelt wurden, aber an heutige Anforderungen angepasst werden. Neben der reinen energetischen Nutzung in Verbrennungsanlagen besteht weiterhin die Möglichkeit der Holzvergasung sowie der Umwandlung des Holzes in Bioethanol. Im Gegensatz zu biogenen Treibstoffen aus landwirtschaftlichen Nutzpflanzen (Zuckerrohr, Mais, Raps, Kartoffeln,...) erreichen Treibstoffe aus Biomasse wie Holz noch keine technologische Marktreife oder werden nur in kleinem Massstab erzeugt. Daher werden sie in der Literatur auch oft als biogene Treibstoffe der zweiten Generation bezeichnet. Einen Überblick über die Wege des Holzes als Energieträger gibt nachstehende Grafik:

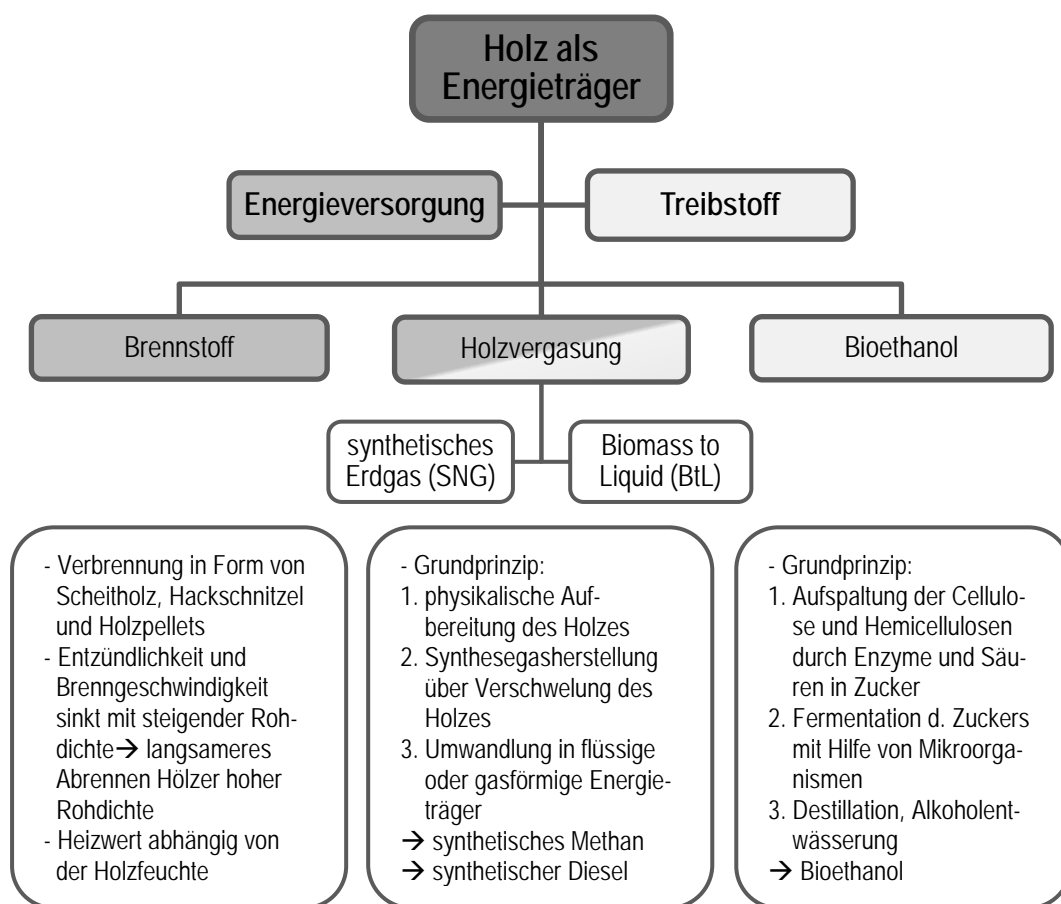


Abb. 3-43: Wege des Holzes als Energieträger

Holzvergasung

Das Prinzip der Holzvergasung kam bereits im Zweiten Weltkrieg für den Antrieb von Motoren zur Anwendung. Kleingehacktes Holz wurde mit wenig Sauerstoff verschwelt,

wodurch ein Gemisch aus brennbaren Gasen (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan) und Nebenprodukten (Teer, Asche, Kohlenstoff) entstand. Diese Gase wurden direkt im Motor verbrannt, was jedoch Substanzen freisetzte, die Nase und Umwelt reizen. Zudem lassen gesetzliche Vorschriften diese mit den Zielen des Kyoto-Protokolls nicht zu vereinbarende Antriebsform nicht mehr zu. Da das Verfahren jedoch genial und ausbaufähig ist, sucht die Wissenschaft neue Wege. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten – die Erzeugung synthetischen Erdgases (SNG) oder Biomass to Liquid (BtL).

Synthetisches Erdgas: Nachdem das Holz entsprechend der Vergasung zu Synthesegas verschwelt wird, kann es anschliessend mittels Katalysatoren in kurzkettenige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden, die Methan entsprechen, einem farb-, geruchlosem und brennbarem Gas, das Hauptbestandteil von Erdgas ist. Ziel der Zukunft sind Grossanlagen, von denen aus synthetisches Erdgas (SNG) ins bestehende Erdgasnetz eingespeist werden soll. An der Entstehung eines solchen Werkes ist u.a. das Paul Scherrer Institut (PSI, Villingen) beteiligt. Dort werden die Grundlagen für eine solche katalytische Methanisierung entwickelt und das Verfahren auf ein Biomassekraftwerk im österreichischen Güssing angepasst. In Zusammenarbeit mit diesem Kraftwerk, der Technischen Universität Wien sowie einer Anlagenbaufirma der Schweiz entstand eine komplette Technologie zur Produktion von SNG. Diese wird derzeit im industriellen Massstab erprobt und ist der Anfang einer kommerziellen Nutzung. Aus 50.000 Tonnen Holz liessen sich 18 Mio. m³ SNG gewinnen, was dem Antrieb für 13.000 Gasautos entspräche, die jeweils 15.000 km fahren (Stucki und Waser 2006).

Biomass to Liquid: Unter diesen Begriff verbergen sich aus Biomasse erzeugte flüssige Treibstoffe, kurz: Biodiesel. Im Gegensatz zu SNG werden keine kurz- sondern langkettige Kohlenwasserstoffe gebildet. Angewendet wird hierbei die schon in den 1920er Jahren entwickelte Fischer-Tropsch-Synthese, bei der zu damaliger Zeit Kohle als Ausgangsprodukt diente. Während des fossilen Erdgas- und Erdölzeitalters geriet das Verfahren in Europa bald in Vergessenheit. Allein Südafrika nutzte es aus wirtschaftlichen und politischen Gründen weiter. Im Zuge der Klimaveränderungen besann man sich auch in Mitteleuropa wieder der Methode, anstatt Kohle wird holzartige Biomasse eingesetzt. Bei der Fischer-Tropsch-Synthese reagieren Wasserstoff und Kohlenmonoxid (Produkte der Holzvergasung) mit Hilfe von Metallkatalysatoren zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Die Reaktion wird so lange wiederholt, bis der gewünschte Endzustand des synthetischen Diesels erreicht ist. Vorteil daran ist die Anpassung des Treibstoffes auf die Erfordernisse der Fahrzeuge. Noch wird das Verfahren nicht grosstechnisch angewendet, jedoch entsteht derzeit im sächsischen Freiberg (Deutschland) durch die CHOREN Industries GmbH eine Anlage, welche in naher Zukunft jährlich 80.000 Tonnen „SunDiesel[®]“ produzieren soll. Längerfristig plant das Unternehmen fünf Anlagen mit einer Gesamtproduktionsmenge von 1 Mio. Tonnen pro Jahr. Kooperationspartner sind Daimler und Volkswagen, die mit dem Namen „SunDiesel[®]“ für ein umweltfreundliches Produkt werben.

Bioethanol oder Cellulose-Ethanol

Bioethanol aus Stroh, Gras oder eben Holz wird auch als Cellulose-Ethanol bezeichnet, da der Ethanol nicht wie bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen direkt aus gespeicherten Zucker in Form von Stärke oder Saccharose gewonnen wird, sondern aus holzartiger Biomasse. Diese Gewinnung zeichnet sich durch eine bessere Umweltbilanz aus, zudem stehen lignocellulosehaltige Rohstoffe im Gegensatz zu Mais, Zuckerrohr oder Raps nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelindustrie. Unterschied zu der herkömmlichen Bioethanolherstellung ist die notwendige vorherige Spaltung der Cellulose und Hemicellulose mit Hilfe von Säuren und Enzymen. in die einzelnen Zucker, ähnlich der

Holzuckergewinnung. Die anschliessende Fermentation, Destillation und Trocknung verläuft analog zum klassischen Prozess. Zur Vergärung (=Fermentation) werden lediglich spezielle Hefepilze benötigt, da neben der üblichen Glukose auch andere Zuckerarten wie Xylose oder Arabinose vergären können.

Die Technologie für eine direkte grosstechnische Anwendung ist allerdings derzeit noch nicht ausgereift oder wettbewerbsfähig, so dass Cellulose-Ethanol noch zu den biogenen Treibstoffen der zweiten Generation gehört. Wie die Holzvergasung ist auch die Nutzung von Ethanol als Treibstoffzusatz kein Phänomen der Neuzeit. Bereits im Zweiten Weltkrieg wurde der aus Holzzucker gewonnene Alkohol für den Fahrzeugantrieb genutzt. Scheinbar unerschöpfliche Erdölquellen liessen jedoch die Produktion in den 1950er Jahren versiegen. In kleinem Massstab produzierte die Borregaard Schweiz AG bis zu ihrer Schliessung Bioethanol aus Resten der Celluloseproduktion. Dabei handelte es sich um das sogenannte Ligninsubstrat, was in flüssiger Form vorlag und neben Lignin und Mineralstoffen auch wertvolle, vergärbare Zucker enthielt. Diese liessen sich mit speziellen Hefen zu einer Maische fermentieren, die etwa 1,5 % Ethanol enthielt. Durch anschliessende Kondensation und Rektifikation (schrittweise Erhöhung des Alkoholgehaltes) wurde reines und hochkonzentriertes Ethanol abgetrennt. Aus 1000 kg Buchenholz wurden auf diesem Wege ca. 50 kg Ethanol gewonnen. Für die Borregaard Schweiz AG bedeutete dies eine Jahresproduktion von ca. 11 Mio. Liter (Seifried 2009). Davon konnte der Schweizer Markt problemlos gedeckt werden. Die Menge des im Jahre 2008 getankten Bioethanols lag bei vier Mio. Litern. Seit Schliessung des Werkes werden die benötigten Mengen zum grossen Teil aus dem europäischen Ausland bezogen (Anonymus 2009d).

Zukunftsansichten der Holzvergasung und des Ethanols

Die Produktion biogener Treibstoffe wurde zwar in den letzten Jahren erheblich vorangetrieben, allerdings lag der Anteil 2008 nur knapp über 1 % gemessen am gesamten Treibstoffverbrauch (Anonymus 2009d). Für eine flächendeckende und europaweite Realisierung solcher Anlagen, auch Bioraffinerien (engl. Biorefinery) genannt, bedarf es weiterer Forschung, aber auch Subventionen vom Staat. Eine derzeitige Um- und Durchsetzung gestaltet sich schwierig, da die Herstellkosten über denen ölbasierter Verfahren liegen. Zudem ist der Endpreis abhängig von der Holzmarktsituation. Tiefe Preise führen dazu, dass Holz in der Hoffnung auf bessere Zeiten eingelagert wird. Hohe Preise hingegen wirken sich sofort auf die Produktionskosten aus. Abhilfe könnten hier neben Fördergeldern auch Zugeständnisse der Forstwirtschaft schaffen. Dass dies funktioniert, bewiesen die Forstleute der ETH 1959, als sie zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit von einheimischem Buchenzellstoff, das Holz direkt der Zellstoffherstellung zuführten.

Holz als Brennmaterial

Ungefähr 60 % des geernteten Laubholzes werden sogleich energetisch genutzt. Das ist zuviel und sollte zugunsten des Laubholzes als Rohstoff vermindert werden. Zumal eine Studie von Thees und Lemm (Quelle) belegt, dass der Wald höhere Mengen an Energieholz bereitstellen könnte, wenn nicht genutzte oder liegen gelassene Sortimente mit verwendet werden. Dabei handelt es sich überwiegend um Waldrestholz. Da im Moment bei Laubholz auch Stammholz besserer Qualität verbrannt wird, wäre bei einer besseren Ausnutzung des Waldrestholzes eine höhere Wertschöpfung des Laubholzes möglich, zumal beim Einschnitt des Holzes ebenso Reste entstehen, die energetisch genutzt werden können. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Restholz im Wald auch gewisse ökologische Funktionen erfüllt, eine Nutzung müsste dementsprechend mit Förstökologen abgestimmt werden. Unter der Voraussetzung,

dass die Neuverteilung gelingt, steht auch einem Einsatz als Brennholz nichts im Wege. Gerade für nicht stofflich verwertbare Reste ist es eine sinnvolle Verwendung, da es hilft, fossile Brennstoffe zu ersetzen. Insgesamt werden in der Schweiz jährlich ca. 3,5 Mio. m³ Holz als Brennmaterial genutzt. Das Holz stammt aus dem Wald, der Schnittholzproduktion oder von Altlasten. Durch verschiedene Anlagen ist es möglich, das Holz in unterschiedlichen Formen zu nutzen. In Frage kommen hierfür Scheit- oder Stückholz, Hackschnitzel, Pellets oder Briketts.

Verbrennungsprozess, Heizwerte und Einflussfaktoren: Störungsfreie, effiziente und emissionsarme Verbrennungen sind jedoch nur unter Berücksichtigung der energetischen Eigenschaften und unter Einbehaltung bestimmter Bedingungen des Holzes möglich. Grundsätzlich gliedert sich der Prozess in eine endotherme (Reaktion unter Wärmeaufnahme) und eine exotherme (Reaktion unter Wärmeabgabe) Verbrennung, wobei das Holz folgende Phasen durchläuft und Energien freisetzt:

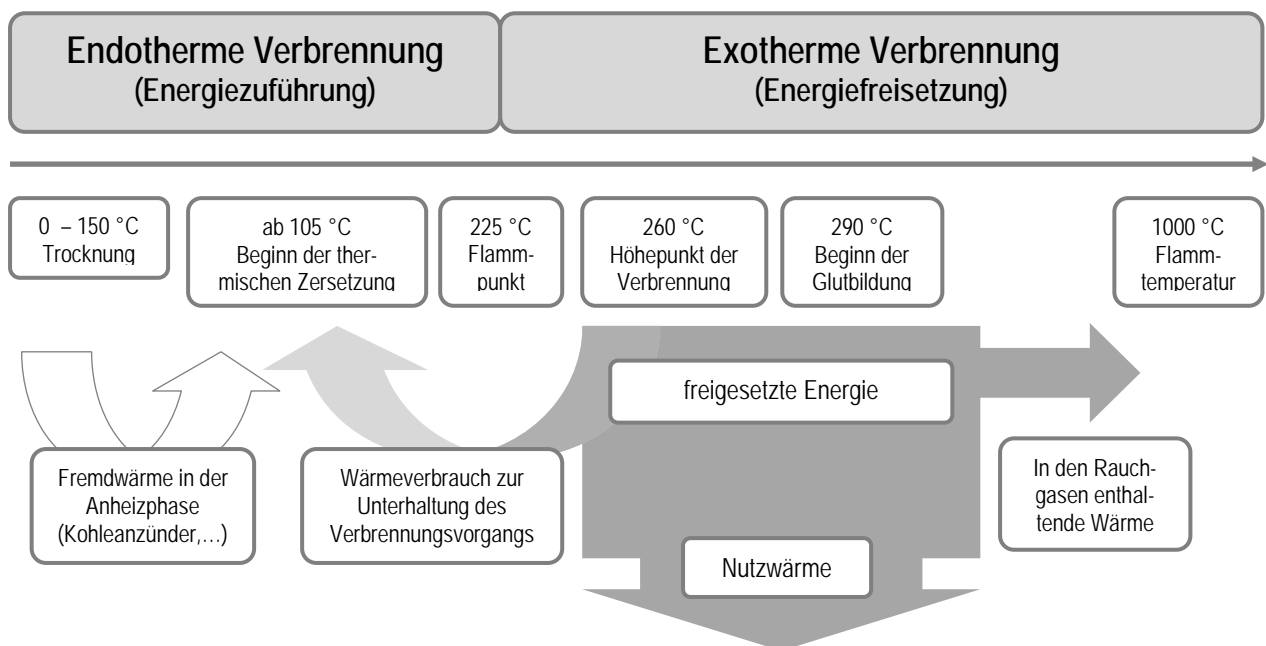


Abb. 3-44: Verbrennungsverlauf und Energiefluss (Gutwasser 2005; Marutzky und Seeger 1999)

Masse für die Verbrennung sind der Brenn- und der Heizwert. Der Brennwert beschreibt die freigesetzte Wärme pro kg absolut trockenes (=atro) Holz. Ausschlaggebend ist jedoch meist der Heizwert, definiert als freigesetzte Wärme pro kg feuchtes Holz. Entscheidenden Einfluss auf beide Größen hat der Feuchte- oder Wassergehalt des Holzes. Im Zusammenhang mit dem Heizwert wird zudem der Wassergehalt angegeben, der sich anders als die Holzfeuchte nicht auf das Darrgewicht, sondern auf das Frischgewicht des Holzes bezieht. Für einen idealen Ausbrand benötigen die meisten Feuerungsanlagen lufttrockenes (=lutro) Holz, d.h. Holzfeuchten von 15 – 20 %. Dieser Zustand kann nach dem Fällen des Holzes durch entsprechende Lagerung im Freiland erreicht werden. Völlig trockenes oder absolut trockenes sollte vermieden werden, da Wasser bei einigen Ausbrandreaktionen beteiligt ist. Zu hohe Holzfeuchten und Wassergehälte allerdings verbrauchen in der ersten Phase der Verbrennung viel Energie zur Verdampfung des Wassers, wodurch der Heizwert herabgesetzt wird. Weiterhin führen sie zu niedrigeren Verbrennungstemperaturen, die wiederum einen unvollständigen Ausbrand sowie Abgase mit Schadstoffen und stechenden Gerüchen verursachen. Folgende Tabelle verdeutlicht den Einfluss der Holzfeuchte auf den Heizwert und die Verbrennungstemperatur:

Tab. 3-20: Verbrennungswert und Heizwert in Abhängigkeit von der Feuchte (Marutzky und Seeger 1999)

Holzfeuchte [%]	Verbrennungstemperatur [°C]	Heizwert [MJ/ kg]
0	1200	17,6
11	1150	15,6
25	1100	13,6
43	1040	11,6
67	960	9,6
100	870	7,6

Neben der Holzfeuchte spielt auch die Anatomie der Holzart eine entscheidende Rolle. Einfluss auf den Verbrennungsprozess haben vor allem die Rohdichte, die Zusammensetzung und verschiedene Bestandteile des jeweiligen Holzes. Niedrigere Rohdichten wie bei Fichte oder Kiefer verursachen eine hohe Entzündlichkeit und schnelle Brenngeschwindigkeiten. Hölzer mit hoher Rohdichte wie z.B. Buche oder Eiche zeichnen sich durch ein langsames und damit längeres Abrennen aus. Je nach Bezug des Heizwertes auf das Gewicht oder das Volumen des Holzes ergeben sich für Nadel- und Laubholz unterschiedliche Werte. Aufgrund des hohen Gehaltes an Lignin und Harzen besitzen Nadelhölzer durchschnittlich einen 5 % höheren Heizwert bezogen auf das Gewicht. Nadelholz weist somit bei einer Holzfeuchte von 0 % einen Heizwert von ca. 5,4 Kilowattstunden (kWh) pro Kilogramm auf im Gegensatz zu Laubhölzern mit nur 5 kWh. Wird allerdings das Volumen als Grundlage herangezogen, so weisen die Laubhölzer aufgrund ihrer höheren Dichte die besseren Werte auf. Das zeigt sich auch bei Hackschnitzeln, wo der Energiegehalt von einem Schüttkubikmeter Nadelholz um bis zu 30 % niedriger ist als von einem Hartlaubholz (Verscheure 1998). In der Tabelle 3-21 sind die Heizwerte einiger Nadel- und Laubhölzer bezogen auf ein Kilogramm, einen Fest³-, Raum⁴- und Schüttraummeter⁵ bei einer Holzfeuchte von 15 % erfasst. Gleichzeitig werden die Heizwerte für Holzpellets und für einen direkten Vergleich zu fossilen Brennstoffen jene von Heizöl und Erdgas aufgeführt.

Tab. 3-21: Heizwerte verschiedener Nadel- und Laubhölzer je Kilogramm, Fest-, Raum- und Schüttraummeter im Vergleich mit Heizöl und Erdgas (nach Bayerischer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2007)

Heizwert [kWh] je	Holzarten oder -materialien						Fossile Brennstoffe	
	Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Eiche	Pellets	Heizöl	Erdgas
Kilogramm	4,32	4,32	4,15	4,15	4,15	4,90	11,0...11,6	10,6
Kubikmeter							10,0	8,9...11,7
Festmeter	1.925	2.189	1.723	2.723	2.786	3.250	/	/
Raummeter	1.348	1.533	1.206	1.906	1.951	/	/	/
Schüttraumm.	770	876	689	1.951	1.115	/	/	/

³ Festmeter: ein Kubikmeter Holz ohne Stapelzwischenräume

⁴ Raummeter: ein Kubikmeter geschichtete Holzmasse einschließlich der Hohlräume

⁵ Schüttraummeter: lose geschüttete Holzmenge von einem Kubikmeter

Ungefähr 2,3 bis 2,5 kg Scheitholz oder 2,05 kg Holzpellets entsprechen 1 Liter Heizöl. Anders ausgedrückt besitzt ein Raummeter Hartlaubholz den gleichen Heizwert wie 230 Liter Heizöl. Der Heizwert von Holz je Kilogramm ist im Vergleich zu Erdgas oder Heizöl zwar niedriger, allerdings ist es ca. 40 % günstiger. Ausserdem gibt Holz bei der Verbrennung nur die Menge an Kohlendioxid frei, die es während seines Lebenszyklus gespeichert hat, womit die Energiebilanz bedeutend besser ausfällt.

Holzheizkraftwerke in der Schweiz

Viele Holzverarbeiter integrieren in ihren Betrieb Holzfeueranlagen oder Schnitzelheizungen. Auf diese Weise lassen sich Holzreste zur Deckung des eigenen Wärme- und Energiebedarfs nutzen. Grosse Holzheizkraftwerke sind in der Lage, ganze Stadtgebiete zu versorgen. In der Schweiz sind bereits zwei dieser Anlagen in Betrieb. Eines davon steht in Domat/Ems im Kanton Graubünden. Mit einem Verbrauch von ca. 260.000 t Holz pro Jahr ist es gleichzeitig das grösste Biomassekraftwerk seiner Art in Mitteleuropa. Aus der Menge lassen sich 125.000 MWh Strom und 200.000 MWh Dampf- und Fernwärmeenergie erzeugen. Seit 2008 produziert ferner das Holzkraftwerk Basel AG 100.000 MWh Wärme und 20.000 MWh Strom aus 80.000 t Wald-, Rest- und Altholz. Der Start einer weiteren Anlage ist für 2010/2011 in Aubrugg im Kanton Zürich geplant; sie wird in die seit 1977 bestehende mit Öl und Gas betriebene Heizzentrale integriert. Die benötigte Holzmenge soll zu 80 % aus Waldhackschnitzeln und Durchforstungsholz und zu 20 % aus Landschaftspflegeholz und unbehandeltem Restholz gedeckt werden, wobei der jährliche Bedarf auf 100.000 t geschätzt wird. Inwieweit eine Beschaffung dieser Menge über längere Zeit gewährleistet ist, ist derzeit unklar, zumal 2012 ein weiteres Holzheizkraftwerk bei Bern in Betrieb genommen wird. Dort wird zum Teil auch Altholz verwertet werden, realisierbar durch moderne Filtertechnologien. Zu 60 % wird jedoch auch hier Frischholz verwendet werden, bestehend zu drei Vierteln aus Laub- und einem Viertel aus Nadelholz (Schwyzer 2009). So fortschrittlich derartige Anlagen zur Verwertung von Holzresten auch sind: von der angestrebten Kakadennutzung bei Laubholz kann bei dieser Verteilung nicht die Rede sein. Zumal für Anlagen dieser Grössenordnung Holz mengen benötigt werden, die durch nähere Waldregionen nicht über längere Zeiträume bereit gestellt werden können. Mit kleineren dezentralen Anlagen liessen sich weite Transportwege sparen und auch kleinere Holzbetriebe hätten die Möglichkeit, ihre Holzreste abzugeben.

3.5 Tabellarischer Überblick über die Verwendungsmöglichkeiten

Tab. 3-22: Tabellarischer Überblick über die Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz

Kategorie	Verwendungsbereich	Beispiele/Details	Laubholzeinsatz		Potential		Entw./For.
			heute	persp.	Masse	Wert	
Vollholzprodukte	Holz- und Ingenieurholzbau	Fachwerke, Dachstühle, Pfetten, Deckenbalken Massivholzbauten, massive Wandsysteme, Brücken, Spielplätze Eisenbahnschwellen, Lärmschutzwände, Holzfassaden, Bodenplatten/Industrieböden	+	++	++	+++	X
	Gartenbereich	Gartenhäuser, Gartenmöbel, Komposter	+	++	+	+++	-
	Innenausbau	Parkett/Dielen, Treppen, Türen, Fenster	++	++	++	+++	X
	Möbelbau	Schränke, Betten, Sitzmöbel, Polstergestelle, Kinde-, Küchen-, Büro-, Badezimmermöbel,...	++	-	++	+++	X
	Särge	Möglichkeit zum Einsatz rotkerniger Buche	+	++	++	++	-
	Mykoholz	durch Weissfäulepilze abgebautes Holz	+	+	+	+	X
	Paletten/Kisten	Vierwege-Flachplatten, Flachpaletten, Transport-, Obst- und Gemüsekisten	+	++	++	+	-
	Sportgeräte	Bowlingbahnen, Barren, Schwebebalken, Sprungkästen, Turnbänke, Sprossenwände,...	+	+	+	+++	-
	Kleinwaren	Werkzeuggriffe, -stiele, Holzdübel, Lamello, Rundstäbe, Handläufe, Schneidbretter,...	+	+	+	++	-
	Spiel-, Dekowaren	Bausteine, Geduldsspiele, Kleinkindspielzeuge, Drechsel-, Schnitzwaren	+	+	+	+++	-
	Musikinstrumente	Tasten-, Saiten-, Blasinstrumente	+	+	+	+++	X
Holzwerkstoffe	Vollholzwerkstoffe	ein- und mehrschichtige Massivholzplatten	++	++	++	+++	X
		Brettschichtholz, Kreuz-, Duo- und Triobalken	+	++	++	+++	X
	Lagenwerkstoffe	Sperrholz, Kunstharz-Pressholz	++	++	++	+++	X
		Brettsperrholz, Furnierstreifenholz (PSL), Furnierschichtholz (LVL)	-	++	++	+++	X
	Spanwerkstoffe	klassische + mineralgebundene Spanplatte, Oriented Strand Board (OSB)	++	+++	+++	++	X
Spanstreifenholz (LSL), Oriented Strand Lumber (OSL)		-	++	++	++	X	
Faserwerkstoffe	Faserplatten, Faserdämmstoffe, Holzfasermotte, Wood-Plastic-Composites	+	++	++	++	X	

+ niedrig/wenig persp.= perspektivisch Masse= Potential der reinen verwertbaren Laubholzmenge
 ++ mittel Entw.= Entwicklung Wert= Höhe der Wertschöpfung
 +++ hoch For.= Forschung ? unbekannt
 - kein Laubholzeinsatz bzw. keine Entwicklung/Forschung x derzeitige Entwicklung/Forschung findet statt

Fortsetzung Tabelle 3-15:

Kategorie	Verwendungsbereich	Beispiele/Details	Laubholzeinsatz		Potential		Entw./For.
			heute	persp.	Masse	Wert	
Modifizierung	Dämpfen/Kochen	Biegeholz	+	+	+	+++	X
	Ammoniakbehandlung	Begasung oder Tränkung mit Salmiakgeist	+	+	+	+++	X
	Chemische Modifizierung	Behandlung des Holzes mit z.B. Essigsäureanhydrid oder Furfurylalkohol	-	++	+	+++	X
	Imprägnierung	mit Metallen, Mono- und Polymeren, polymerisierbaren Chemikalien	+	++	+	+++	X
	Thermische Mod.	Behandlung mit: Wasserdampf, Inertgas, heissem Öl, Vakuumpresstrocknung	+	++	++	+++	X
Zusatzdienstleistungen	Stoffliche Verwertung	Lebensmittelherstellung, Filtermaterial, Werkstoffe aus Holzmehl, Holzwolle	+	++	++	+	X
	Chemische Verwertung	Cellulose: Holzstoff, Zellstoff, Papier, Dämmstoffe, Regeneratcellulose, Holzverzuckerung Lignin: Biowerkstoffe, Vanillin, Aktivkohle, Dünge-, Dispergiermittel, Brennmaterial,...	+	++	++	++	?
	Holz als Energieträger	Brennmaterial Holzvergasung, Bioethanolherstellung	+++	?	+++	+	X
			-	?	+++	+	?

+ niedrig/wenig persp.= perspektivisch Masse= Potential der reinen verwertbaren Laubholzmenge
 ++ mittel Entw.= Entwicklung Wert= Höhe der Wertschöpfung
 +++ hoch For.= Forschung ? unbekannt
 - kein Laubholzeinsatz bzw. keine Entwicklung/Forschung x derzeitige Entwicklung/Forschung findet statt

4 SCHLUSSFOLGERUNG/WEGE AUS DER KRISE

Das schwerwiegendste Problem der Schweizer Laubholzindustrie besteht derzeit nicht in der mangelnden Verwendung, sondern in der nicht adäquaten Verteilung auf die einzelnen Sortimenten der Holzernte. Die beinahe einseitige Verwertung für energetische Zwecke fördert zwar die Unabhängigkeit von fossilen Ressourcen, das Ziel einer zukünftigen Kaskadennutzung wird so jedoch verfehlt. Wichtig werden vor allem langfristige Lösungen sein, die beiden Ansprüchen zufriedenstellend genügen. Dieser Schritt ist nicht von heute auf morgen zu bewältigen. Es bedarf weiterer Umsetzungsprojekte aufbauend auf den Analysen und Recherchen der bisher überwiegend theoretisch angelegten Arbeiten. Damit wird vor allem den Praktikern signalisiert, dass die Verantwortlichen das Thema ernst nehmen. Wichtig werden Veranstaltungen sein, die dazu beitragen, Erfahrungen, wissenschaftliche Ergebnisse und politische Schritte zu kommunizieren. Dadurch kann der Austausch unter den Interessenvertretern gefördert werden; ausserdem können offene Fragen geklärt und frühzeitig Lösungskonzepte geformt und gelenkt werden. Dabei ist man allerdings auf die Initiative der Forstwirtschaft, der Säge- und Holzindustrie sowie der Politik angewiesen. In Kooperationen müssen gemeinsam Lösungen entwickelt werden. Jeder einzelne der drei Bereiche muss jedoch ernsthaft beabsichtigen, Änderungen im eigenen Arbeitsfeld in Angriff zu nehmen. Im folgenden werden verschiedene Massnahmen vorgeschlagen, die mögliche Wege aus der Krise aufzeigen.

4.1 Optionen der Forstwirtschaft

Die Meinungen zur derzeitigen Lage des Waldes und der Holzindustrie sind uneinheitlich. Einig ist man sich über einen nachhaltigen und naturnahen Waldbau, doch bei der Wahl der Holzart gehen die Ansichten auseinander. Aufgrund der steigenden Holznachfrage, vor allem im nadelholzdominierten Holzwerkstoffbereich, wird vielfach eine Stärkung und Aufforstung der Fichte gewünscht, um den zukünftigen Bedarf decken zu können. Laubholz, besonders die Buche, wird favorisiert, da es dem Wald die nötige Stabilität gibt und Stürmen besser stand hält.

Fakt ist, dass die Fichte als Baumart des Gebirges oder des Nordens kühle und feuchte Standorte bevorzugt. In tieferen Lagen wurde sie künstlich verbreitet, da sie gerade und schnell wächst und somit einen idealen Rohstoff für die Nutzholzindustrie darstellt. Als Folge dessen wurde die ursprünglich dominierende und an die Umwelt angepasste Buche immer stärker verdrängt. Reine Fichtenwälder sind jedoch aufgrund ihres Flachwurzelsystems bei Sturmereignissen umsturzgefährdet und bilden gerade in heissen und trockenen Sommern ideale Brutgelage für Borkenkäfer (insbesondere Buchdrucker). Eine alleinige Aufforstung der Fichte könnte daher für das Ökosystem Wald katastrophale Folgen nach sich ziehen. Anhänger dieser Waldbaupolitik sollten daher ihr Argument einer wirtschaftsabhängigen Holzart überdenken. Die Recherche zeigt deutlich, dass gerade im Holzwerkstoffbereich qualitativ gleichwertige Produkte aus Laubholz hergestellt werden können. Mischungen aus Laub- und Nadelholz würden es erlauben, bestehende Technologien zu erhalten und erweitern zu können. Auch die Zahlen des dritten LFI bekunden, dass die Mehrheit der Forstleute Mischbestände den Monokulturen vorzieht und damit Lösungen für Nadel- und Laubholz gefunden werden müssen.

Im Gegensatz zur künstlich angesiedelten Fichte würde sich die geographisch angepasste Buche auch für Reinbestände eignen. Eine frühe Freistellung der Bäume, die ausreichende Zwischenräume gewährleistet, führt zu zwar kürzeren, aber dicken und spannungsfreien Buchenstämmen, da die gegenseitige Konkurrenz um Sonnenlicht stark reduziert wird. Dass

dies funktionieren kann, beweisen Frankreich und Dänemark: deren Forstpolitik verschafft der Buche Freiräume und der Wirtschaft qualitativ hochwertiges Buchenholz. Buchen aus Mischbeständen wie in der Schweiz sind meist lang, schlank und durch das Streben nach Licht oft krumm und reich an Eigenspannungen. Eine entsprechende Kombination beider Bestandsarten würde ausreichende Qualitäten in allen Sortimenten gewährleisten. Gerade hochwertiges Buchenholz der Qualitätsklasse A wird überwiegend aus dem Ausland importiert. Absatzprobleme für dieses Holz gibt es nicht, zudem ist die Wertschöpfung hoch und eine energetische Nutzung ausgeschlossen. Bisher ungenutzte im Wald belassene Erntesortimente würden helfen, den Bedarf an Energieholz zu decken. Stattdessen könnten B- und C-Stammqualitäten ihren eigentlichen Zweck als Sägeware erfüllen. Laubholz soll kein Totalersatz für Nadelholz werden, sondern als Chance für eine vielfältige, generationenübergreifende Waldlandschaft und eine stabile ausgewogene Holzindustrie gesehen werden.

4.2 Optionen der Säge- und Holzindustrie

Die Studie von Lüthi (2010) hat offen gelegt, dass die Wertschöpfungskette vom Rundholz zum Endprodukt in der Schweiz nicht geschlossen ist. In erster Linie fehlt die Weiterverarbeitung des Schnittholzes zum Halb- oder Endfabrikat. Diese werden zum grossen Teil im Ausland bezogen, gefertigt mitunter aus vorher exportiertem Rund- oder Schnittholz. Für nicht genutzte Sortimente war und ist daher die energetische Verwertung noch immer die komfortabelste und profitabelste Lösung.

Für einen funktionierenden Arbeitsfluss wäre es äusserst wichtig, die Lücke in der Wertschöpfungskette mit einer intakten Weiterverarbeitungsindustrie zu schliessen. Dies kann zum einen über die Ansiedelung geeigneter Firmen in Sägewerksnähe geschehen. Andernfalls besteht auch für die Sägereien die Möglichkeit, ihre Produktpalette mit Hilfe einer eigenen bzw. ausgebauten Weiterverarbeitung zu erweitern. Kein Betrieb wird sich auf jedoch auf Investitionen einlassen, ohne etwaige negative Folgen absehen zu können. Staatliche Hilfen werden deshalb unabdingbar sein. Auch Risikobereitschaft kann sich lohnen. Das betrifft in erster Linie die Förderung von Absatzmärkten, in denen Produkte und Technologien neu- bzw. weiterentwickelt werden. Neben reinen Innovationen wäre auch die Nutzung alter und schon teilweise in Vergessenheit geratener Erfindungen und Erfahrungen und deren Anpassung an heutige Erfordernisse denkbar. Mögliche Halb- und Endprodukte aus dem Weiterverarbeitungsprozess sind u.a.:

- ◆ Holzwerkstoffe
 - ein- und mehrschichtig Massivholzplatten aus Laubholz (z.B. rotkernige Buche)
 - Brettschichtholz aus Laubholz oder Hybridträger mit Mittellagen aus Nadelholz und äusseren Lagen aus Laubholz
 - Duo- und Triobalken aus Laubholz
 - Furnierschichtholz (LVL) aus Buche

- ◆ Holzbauprodukte
 - Fassadenelemente
 - Lärmschutzwände aus Thermolaubholz
 - Massivholzelemente für den Hausbau
 - Gartenhäuser

- ◆ Innenausbauprodukte
 - Parkettfriese
 - Fenster- und Türenkanteln aus Thermolaubholz oder in Kombination mit Vorsatzschale
 - Treppenstufen aus Hartlaubholz
 - Bodenplatten/ Industrieböden aus Hartlaubholz
- ◆ Möbelbau
 - Möbel aus rotkerniger Buche
 - Möbelserien für Kindergärten
 - Badezimmermöbel und –inventar (Spiegelschränke, WC-Deckel)
 - Flurinventar (Garderoben, Garderobenstände)
- ◆ Sonstiges
 - Säрге aus rotkerniger Buche
 - Kleinwaren (u.a. Rüstbretter, Holzdübel, Bilderrahmen, Rundstäbe, Handläufe)
 - Holzmodifizierungen
 - Vorvergrautes Holz
 - Produkte aus Holzmehl und Holzspänen (WPC, Bodenbeläge)
 - Ausweitung der chemischen Nutzung

4.3 Politische Massnahmen

Signifikante Änderungen in der derzeitigen Laubholzverwertungspraxis werden nur durch politische Massnahmen realisierbar sein. Dazu zählen einerseits Förderungen in Form von begleitender Beratung und finanzieller Unterstützung zum Aufbau einer Weiterverarbeitungsindustrie. Ebenso wichtig wäre die Sensibilisierung der Bevölkerung für diese Thema. Viele sehen Holz als umweltfreundlichen und ökologischen Werkstoff, bedenken aber nicht die weiten Transportwege und mitunter menschenwürdigen Ernteverfahren. Im Obst- und Gemüsektor wurde dieses Problem mit einer Herkunftskennzeichnung der Ware gelöst. Warum dies nicht auf den Holzmarkt mit einem wiedererkennbaren Label ausweiten? Eine solche Kennzeichnung würde sich im Baumarkt, Möbelgeschäft oder Spielzeugwarenereich anbieten. Die Kunden könnten so ihr Einkaufsverhalten steuern und bewusst zwischen importierten und einheimischen Produkten wählen. Aufklärende Broschüren könnten die Vorteile und positiven Effekte des Kaufs einheimischer Holzprodukte aufzeigen. Die Bewohner der Schweiz zeigen sich überwiegend naturverbunden und umweltbewusst. Im Lebensmittelsektor sind sie froh darüber, dass das Angebot ohne Eier aus Käfighaltung oder importierte Milch auskommt. Sicherlich wären viele Kunden auch bereit, einen Aufschlag auf einheimisches Holz zu zahlen, jedoch müssen sie hierzu zunächst einmal die Möglichkeit einer Wahl erhalten. Anstrengungen in diese Richtung werden zwar derzeit schon unternommen, allerdings steht das angestrebte Herkunftszeichen „Schweizer Wald“ nur für Produkte, deren Rohstoffe zu 70 % aus dem Schweizer Wald stammen. Mit Öffentlichkeits- und Pressearbeit könnte die Laubholzproblematik der Bevölkerung vermittelt werden. Dass dies möglich ist, bewies die Februar Ausgabe der Zeitschrift GEO mit dem Artikel „Lothars Erben“ über die Laubholzsituation in der Schweiz sowie die Neue Zürcher Zeitung, die am 16. März 2010 über die Ergebnisse des dritten LFI berichtete.

Aus der Sicht des Holzbaus besteht Bedarf für Veränderungen und Entwicklungen in der aktuellen Normensituation. Besonders wichtig ist die Erstellung von Bemessungsgrundlagen für laubholztragende Konstruktionen, um Firmen die Herstellung zu vereinfachen. Weitere orientierende Forschungsprojekte können hier Klarheit schaffen. Die Schweiz sollte ihren Vorteil gegenüber der EU nutzen, denn die zuständige Holzbaunorm SIA 265 (2003) erlaubt derzeit neben Nadelholz bereits andere Rohstoffe und damit auch Laubholz.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Das dritte und aktuellste schweizerische Landesforstinventar (LFI, 2004-2006) bescheinigte für Laubholz eine Vorratssteigerung von 11,96 Mio.m³, wohingegen der Nadelholzvorrat um 2.4 Mio.m³ sank. Trotz dieser positiven Waldbestandessituation steckt die Laubholzverarbeitung der Schweiz in einer Krise. Hauptproblem ist jedoch nicht die Nutzung zu geringer Mengen, sondern die Verteilung des geernteten Holzes auf die drei Sortimenten Stamm-, Industrie- und Energieholz. Beinahe 60 % des Laubholzes werden sogleich energetisch verwertet, ohne es einer vorherigen Nutzung zuzuführen. Die Gründe liegen neben einer schwierigeren Verarbeitung im tatsächlich nutzbaren Stammholzanteil der Laubhölzer (45 %), der weit unter dem der Nadelhölzer liegt (80 %). Weiterhin fehlen für den Einsatz im tragenden Holzbau Bemessungsgrundlagen für Verklebung und Festigkeitssortierung. Existierende Normen und Leistungsanforderungen sind auf Nadelholz ausgerichtet und nicht direkt auf Laubholz übertragbar. In der EU erlaubt zudem die zuständige Holzbaunorm EN 14080 als einzige Laubholzart Pappel und keine Mischung von Nadel- und Laubholz. Auch in der Schweiz fehlen noch Bemessungsgrundlagen, allerdings sind nach SIA 265 neben Nadelhölzern bei Erfüllung der Anforderungen auch andere Materialien zugelassen. In der Schweiz fehlen vor allem Absatzmärkte und eine funktionierende Weiterverarbeitungsindustrie nach dem Stammholzeinschnitt. Die energetische Nutzung war daher für nicht genutzte Sortimente bisher die komfortabelste und lohnendste Lösung, obwohl die Verwendungsmöglichkeiten enorm vielfältig sind. Neben der Verarbeitung zu Vollholzprodukten und Holzwerkstoffen kann das Holz modifiziert werden oder als Rohstoff für Zusatzdienstleistungen dienen.

Vollholzprodukte: Mit der Entwicklung von Holzwerkstoffen nahm auch der Einsatz von Vollholz ab, dennoch existieren zahlreiche Möglichkeiten. Im Holzbaubereich könnte Laubholz interessant für einzelne konstruktive Elemente werden, um höhere Festigkeiten oder geringere Dimensionen zu erzielen. Das Schweizer Projekt „Woodstock“ demonstriert anschaulich die Eignung von Buchenholz für Wand- und Deckenelemente eines mehrgeschossigen Gebäudes. Weitere Anwendungsfelder im Holzbau sind Spielplätze, Lärmschutzwände, Holzfassaden, Eisenbahnschwellen oder Industrieböden. Im Innenausbau sind Laubhölzer ideal bzw. geeignet für Parkett, Dielen, Treppen, Türen und Fenster mit Vorsatzschale. Möbel bestehen nur noch zu einem geringen Anteil aus Laubvollholz, da viele Komponenten verleimt werden und damit zu den Holzwerkstoffen gehören, jedoch ist die Abgrenzung mitunter unscharf. Steigende Beliebtheit erfährt hier vor allem die schwer absetzbare rotkernige Buche, da sie ein individuelles Design verspricht. Interessant wäre dieses Holz auch für Säрге. Ferner findet Laubvollholz Verwendung in Paletten, Spielzeug, Musikinstrumenten, Sportgeräten und Kleinwaren wie Handläufen, Rüstbrettern oder Werkzeuggriffen.

Holzwerkstoffe: Für nicht konstruktive Vollholz- und Lagenwerkstoffe wie Massivholzplatten sowie Sperrhölzer ist der Einsatz von Laubhölzern üblich, was auch für den tragenden Holzbau umsetzbar ist. Im Brennpunkt stehen besonders BSH, Duo- und Triobalken sowie Furnierschichtholz besonders aus Buche, Esche und Eiche. Untersuchungen zum Thema zeigen, dass mit Laubhölzern (auch rotkerniger Buche) oder Kombinationen aus Nadel- und Laubholz deutlich höhere Festigkeiten und stabilere Verbindungen realisierbar sind (Frühwald et al. 2003, Blaß et al. 2005, Frese 2006, Blaß und Frese 2006, Ohnesorge 2009). Erste Lockerungen in der Normung genehmigt die Ende 2009 in Deutschland erteilte bauaufsichtliche Zulassung für BSH aus Buche für tragende Zwecke im Innenbereich. Spanwerkstoffen, besonders Spanplatten, werden Laubhölzer bis zu einem Anteil von 40 % beigemischt. Höhere oder reine Anwendungen sind möglich (Klauditz 1952; Klauditz und

Buro 1960; Buschbeck et al. 1961; Kehr 1962; Kehr und Schilling 1965a, b; Grigoriou 1981; Vos und Kharazipour 2008) und wurden schon in den 1950er Jahren in Deutschland, der ehemaligen DDR und Tschechoslowakei produziert. Für Faserwerkstoffe werden so gut wie kein Laubhölzer eingesetzt, obwohl sie sich aufgrund ihrer Faserstruktur für den Trockenprozess eignen und normgerechte MDF und HDF realisierbar sind (Krug und Mäbert 2007).

Verwendung nach Modifizierung: Verschiedene chemische, thermische oder elektrische Verfahren ermöglichen die Modifizierung des Holzes. Untersuchungen zur Acetylierung von Laubholz mit Essigsäureanhydrid wurden durchgeführt (Tarkow et al. 1946; Militz 1991), allerdings bis heute nicht industriell umgesetzt. Vielversprechender scheinen die thermische Behandlung und Imprägnierung. Im Rahmen des Verbundprojektes „Innovative modifizierte Buchenholzprodukte“ (Leitung: Institut für Holzbiologie und Holztechnologie/ Universität Göttingen) gelang die Anhebung der Dauerhaftigkeit von Buchenholz in die Dauerhaftigkeitsklasse 1 durch die Imprägnierung mit einer wasserbasierten DMDHEU-Lösung, deren Praxistauglichkeit im Moment an einigen Produkten geprüft wird. Die thermische Modifizierung von Laubholz untersuchten u.a. Oelhafen (2005), Bächle und Schmutz (2006) sowie Wetzig (2010). Grundsätzlich führte das Verfahren zu einer Dimensionsstabilisierung, Resistenzerhöhung und dunkleren Farbe des Holzes. Im Aussenbereich ist damit die Verwendung für Spielplätze, Fassaden und Lärmschutzwände möglich. Aufgrund der dunklen Farbe bietet sich Thermolaubholz als Tropenholz-Ersatz in der Parkettherstellung an.

Zusatzdienstleistungen: Mindere Holzqualitäten und Holzreste sind ideal, um das Laubholz stofflich, chemisch oder als Energieträger zu nutzen. Laubholz kann stofflich zur Anzucht von Speisepilzen, Aromatisierung von Wein, Filtrierung von Schwermetallen und Herstellung von Kunststoffen, Linoleum oder der Schweizer Erfindung „iwood“ (ein poröser Holzwerkstoff aus Holzmehl, Wasser und Stärke) verwertet werden. Das wichtigste Gebiet der chemischen Verwertung ist die Zellstoff- und Papierherstellung aus Cellulose. Nadelholzzellstoff führt zu Papieren mit hoher Dichte und Festigkeit sowie gleichmässiger Oberfläche, wohingegen Papier aus Laubholzzellstoff grob, porös, opak und saugfähig ist. Einheimisch genutzte Laubhölzer werden jedoch aufgrund des zunehmenden Ersatzes durch schnell wachsende Plantagenhölzer mehr und mehr zurückgedrängt. Weitere Celluloseprodukte sind Celluloseester, -ether, Holzucker und Regeneratcellulose. Lignin wird meist energetisch verwertet, obwohl es sich für unterschiedlichste Produkte wie Vanillin, Binde- und Düngemittel sowie Biomaterialien eignet. Für den Einsatz von Laubholz als Energieträger sollten zum Einschnitt geeignete Sortimente tabu sein. Unter Beachtung diese Aspekts existieren drei Wege der Nutzung: Verbrennung, Holzvergasung und die Produktion von Bioethanol.

Die Recherche lässt deutlich erkennen, dass die energetische Nutzung nicht die einzige Verwertungsmöglichkeit für Laubholz ist. Die augenblicklichen Probleme sind jedoch nur durch die Initiative und Kooperation von Forstwirtschaft, Holz- und Sägeindustrie sowie Politik lösbar. In erster Linie sind Absatzmärkte zu entwickeln, eine Weiterverarbeitungsindustrie aufzubauen, weitere Forschungsprojekte zu lancieren und Endverbraucher aufzuklären wie die zusammenfassende Grafik 5-1 zeigt:



Abb. 5-1: Mögliche Wege aus der Schweizer Laubholzabsatzkrise

6 LITERATURVERZEICHNIS

- ACKERMANN, T. 2009. HESS & CO. AG Sperrholzfabrik. Persönliche Nachricht. 13.10.2009.
- AICHER, S. und REINHARDT, H. W. 2007. Delamination properties and shear strength of glued beech wood laminations with red heartwood. *Holz als Roh-und Werkstoff* 65: 125-136.
- AIGNER, T., JOSCAK, T., BARBU, M. C., AIGNER, M. und SCHRENK, M. 2009. Bessere Keilzinkenstösse für Brettsperrholz. *Holz-Zentralblatt* 48: 1219-1220.
- ALPÁR, T. und RÁCZ, I. 2007. Production of cement-bonded particleboard from poplar. In B. Laszlo [ed.], Third Conference on Hardwood Research and utilisation in Europe, University of West Hungary. Faculty of Wood Sciences. Sopron.
- ANONYMUS. 2007. Grenzwerteverordnung 2007-GKV 2007. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Österreich.
- ANONYMUS. 2008a. Technische Regeln für Gefahrstoffe-TRGS 553-Holzstaub. Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS). Deutschland
- ANONYMUS. 2008b. Merkblatt "Dauerhaftigkeit von TMT (Thermoholz)", Institut für Holztechnologie Dresden gGmbH, Dresden.
- ANONYMUS. 2009a. Parkettmarkt Schweiz: Parkett und Laminat gleichauf. *Holz-Zentralblatt* 135: 1060.
- ANONYMUS. 2009b. In vielen Branchen weniger Holz nachgefragt. *Holz-Zentralblatt* 135(17): 410.
- ANONYMUS. 2009c. Ilsfelder Unternehmen liefert Natrurrohstoff für Gucci-Pumps. *Deutscher Depeschendienst. Berlin.*
- ANONYMUS. 2009d. Prognosen und Potentiale. In energieschweiz [ed.]. Ernst Basler + Partner AG. www.bio-sprit.ch. Zugriff: 21.01.2010.
- ANONYMUS. 2010. Persönliche Nachricht. 07.06.2010.
- ASTM D 2559-04. 2004. Adhesives for Structural Laminated Wood Products for Use Under Exterior (Wet Use) Exposure Conditions.
- AUTORENKOLLEKTIV. 1975. Werkstoffe aus Holz und andere Werkstoffe der Holzindustrie. Fachbuchverlag, Leipzig.
- AUTORENKOLLEKTIV. 2001. Stresses in beech. Final report. Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien. Laboratoire de Mechanique et Genie Civil, Universté Montpellier 2. Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research. KVL, Forest and Landscape Research Centre. FAIR-Project CT98-3606.
- BÄCHLE, F. und NIEMZ, P. 2005. Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Vorbehandlung auf das Sorptionsverhalten und ausgewählte mechanische Eigenschaften von Fichtenholz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 156: 47-51.
- BÄCHLE, F. und SCHMUTZ, A. 2006. Industrielle Untersuchungen zur Optimierung der Eigenschaften von thermisch vergütetem Holz, insbesondere Laubholz. Int. Bericht ETHZ/IfB-HP Nr. 36. Zürich.

- BÄCHLE, F., NIEMZ, P. und HEEB, M. 2004. Untersuchungen zum Einfluss der Wärmebehandlung auf die Beständigkeit von Fichtenholz gegenüber holzerstörenden Pilzen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 155: 548-554.
- BAFU. 2009. Jahrbuch Wald und Holz 2008. Umwelt-Wissen Nr. 0904. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BARTHOLME, B., AVRAMIDIS, G., VIÖL, W. und KHARAZIPOUR, A. 2009. Herstellung von organisch gebundenen Holzfasern-Dämmplatten aus Buchenholz. *Holztechnologie* 50: 23-26.
- BERNASCONI, A. 2004. Verleimung von Laubholz für den tragenden Einsatz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 155: 533-539.
- BERNER FACHHOCHSCHULE, D. A., HOLZ UND BAU. 2007. Fenster aus Laubholz bleiben schwierig. *Die Schreinerzeitung* 1.
- BĒRZIŅŠ, G. 1972. Holzplastifizierung als Weg zur qualitätserhöhenden Werkstoffsubstitution. *Holztechnologie* 13: 103-110.
- BLAß, H. J. und FRESE, M. 2006. Biegefestigkeit von Brettchichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buche und Kernlamellen aus Nadelholz, Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.
- BLAß, H. J., DENZLER, J., FRESE, M., GLOS, P. und LINSEMAN, P. 2005. Biegefestigkeit von Brettchichtholz aus Buche. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*. Hrsg.: Universität Karlsruhe. Universitätsverlag Karlsruhe.
- BOLLMUS, S., DIESTE, A., MILITZ, H. und RADERMACHER, P. 2009. Materialeigenschaften von modifiziertem Buchenholz. *Forst und Holz* 64: 30-34.
- BOZELL, J. J., HOLLADAY, J. E., JOHNSON, D. und WHITE, J. F. 2007. Top value added chemicals from biomass-Volumen II: Results of Screening for Potential Candidates from Biorefinery Lignin. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) and the National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- BRÄNDLI, U. B. 2010. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, BAFU.
- BRANDMAIR, A., HASS, P., CLAUB, S., HERING, S. und NIEMZ, P. 2010. 1-K-PUR-Klebstoffe für tragende Holzbaukonstruktionen aus Laubholz. ETH Zürich/ Institut für Baustoffe. Interne Ergebnisse.
- BRAUN, R. 2010. Kronospan Schweiz AG. Persönliches Gespräch. 04.06.2010.
- BRINKMANN, E. 1979. OSB-Platten, ihre Eigenschaften, Verwendung und Herstellungstechnologie. *Holz als Roh- und Werkstoff* 37: 139-142.
- BUCHHOLZER, P. 1995. MDF aus unterschiedlichen Laub- bzw. Nadelhölzern und Bindemitteln. *Holz-Zentralblatt* 121: 600-601.
- BÜREN, C. v. 2009. Auch Schweizer Möbelbranche mit Umsatzrückgang. *Holz-Zentralblatt* 42: 1061.
- BURMESTER, A. 1973. Effect of Heat-Pressure-Treatments of Semi-Dry Wood on Its Dimensional Stability. *Holz als Roh- und Werkstoff* 31: 237-243.

- BUSCHBECK, L., KEHR, E. und JENSEN, U. 1961. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. 1. Mitteilung: Rotbuche und Kiefer. *Holztechnologie* 2: 99-110.
- CARUS, M., MÜSSIG, J. und GAHLE, C. 2008. Naturfaserverstärkte Kunststoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow.
- CHUI, Y. H., SCHNEIDER, M. H. und ZHANG, H. J. 1994. Effects of Resin Impregnation and Process Parameters on Some Properties of Poplar Lvl. *Forest Products Journal* 44: 74-78.
- CIOLDI, F., HEROLD, A. und ULMER, U. 2009. Waldressourcen nach Produktionsregionen. *Landesforstinventar info* 10(2009).
- CORBAT, P. 2010. Corbat Holding SA. Persönliches Gespräch. 16.02.2010.
- DIN 1052. 2008. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4074-1. 2008. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4074-5. 2008. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 5: Laubschnittholz. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 68000-3. 2009. Holzschutz - Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 301. 2006. Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Phenoplaste und Aminoplaste - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 302-1. 2004. Klebstoffe für tragende Holzbauteile - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Längszugscherfestigkeit. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 312. 2009. Spanplatten - Anforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 313-1. 1996. Sperrholz Klassifizierung und Terminologie. Teil 1: Klassifizierung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 316. 2009. Holzfaserplatten - Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 338. 2008. Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 548. 2004. Elastische Bodenbeläge - Spezifikation für Linoleum mit und ohne Muster. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 636. 2003. Sperrholz: Anforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 622-5. 2010. Faserplatten - Anforderungen - Teil 5: Anforderungen an Platten nach dem Trockenverfahren (MDF). DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 975-1. 2009. Schnittholz - Sortierung nach dem Aussehen von Laubholz - Teil 1: Eiche und Buche. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1912. 2009. Bauholz für tragende Zwecke - Festigkeitsklassen - Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN EN 13226. 2009. Holzfussböden - Massivholz-Elemente mit Nut und/oder Feder. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 14080. 2009. Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 14279. 2009. Furnierschichtholz (LVL) - Definitionen, Klassifizierung und Spezifikationen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 14374. 2005. Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DURAND-RAUTE, I. L. 1988. Laminated veneer lumber from aspen veneer. Company Report.
- ECKELMAN, C. A., HOOVER, W. L., JOKERST, R. W. und YOUNGQUIST, J. A. 1979. Utilization of Red Oak Press-Lam as Upholstered Furniture Frame Stock. *Forest Products Journal* 29: 30-40.
- EGNER, K. und KOLB, H. 1966. Geleimte Träger und Binder aus Buchenholz. *Bauen mit Holz* 4: 147-154.
- ELMENDORF, A. 1965. Oriented Strand Board. Patent Nr. 3164511. Palo Alto, Kalifornien, USA.
- ELMENDORF, A. 1969. Orienting Wood Strands. Patent Nr. 3478861. Palo Alto, Kalifornien, USA, United States Patent Office.
- EMPA. 2008. Stradivari-Klang dank Pilzbefall, Medienmitteilung. EMPA, Dübendorf.
- ENDRESS, S. 1994. Die Raumacline: Chemie und Physiologie einer neuen Alkaloidgruppe. Diss., Univ Mainz, 1994, Mainz.
- FAOSTAT. 2009. <http://faostat.fao.org/> (Stand 17.06.2009).
- FINK, H. P., EBELING, H. und VORWERG, W. 2009. Cellulose technology and starch processing. *Chemie Ingenieur Technik* 81: 1757-1766.
- FRESE, M. 2006. Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006, Univ.-Verl. Karlsruhe, Karlsruhe.
- FRONIUS, K. 1989a. Spaner, Kreissägen, Bandsägen. DRW-Verlag, Stuttgart.
- FRONIUS, K. 1989b. Der Rundholzplatz. DRW-Verlag, Stuttgart.
- FRONIUS, K. 1991. Gatter, Nebenmaschinen, Schnitt- und Rundholzbehandlung. DRW-Verlag, Stuttgart.
- FRÜHWALD, A., RESSEL, J. B. und BERNASCONI, A. 2003a. Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Abschlussbericht. Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg.
- FRÜHWALD, A., RESSEL, J. B., BECKER, P., POHLMANN, C. M. und WONNEMANN, R. 2003b. Verwendung von Laubhölzern zur Herstellung von Leimholzelementen. Abschlussbericht. Universität Hamburg - Zentrum Holzwirtschaft, Ordinariat für Holztechnologie.
- FRÜHWALD, K. und SCHICKHOFER, G. 2005. Strength Grading of Hardwoods, Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 14 (2005), 199-210.

- FUCHS, W. und HORN, O. 1928. Information on genuine lignin, II. Effect of bromine on acetylated fir wood. *Berichte Der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 61: 2197-2202.
- FUHRMANN, C. 2010. Persönliche Nachricht. 03.03.2010.
- GEHRI, E. 1980. Möglichkeiten des Einsatzes von Buchenholz für Tragkonstruktionen. Eig. Technische Hochschule. Abt. Baustatik und Stahlbau.
- GEHRI, E. 1985. High-Performance Jointing Techniques - State of Art and Development. *Holz als Roh-und Werkstoff* 43: 83-88.
- GEHRI, E. 1993. Holzwerkstoffe auf Furnierbasis Schicht- und Sperrhölzer für den statischen Einsatz, 25. Fortbildungskurs der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung SAH, 3./4. November 1993 in Weinfelden. SAH, Zürich.
- GIEBELER, E. 1983. Dimensional Stabilization of Wood by Moisture-Heat-Pressure-Treatment. *Holz Als Roh-Und Werkstoff* 41: 87-94.
- GRIGORIOU, A. 1981. Influence of Different Wood Species on the Properties of Threelayer Particleboard and Their Surface-Layers. *Holz als Roh-und Werkstoff* 39: 97-105.
- GUTWASSER, F. 2005. Holzchemie, 2. Semester Holztechnik, Skript, Fachhochschule Eberswalde.
- HAMM, J. und HÖLTSCHI, C. 2005. Massivholz-Bauweise. Lignatec. Berner Fachhochschule, Department Architektur, Holz und Bau.
- HAPLA, F. und OHNESORGE, D. 2005. Qualitätsorientierte Schnittholzausbeute in Abhängigkeit von Durchmesser und Rotkernanteil bei Buchenstammholz - ein Modellansatz mit unterschiedlichen Einschnittarten. *Holztechnologie* 46: 5-9.
- HÄRTEL, C. 2002. Pappel bringt astfreies Brettschichtholz. *mikado* 3: 58-60.
- HOOVER, W. L., ECKELMAN, C. A., JOKERST, R. W. und YOUNGQUIST, J. A. 1979. Economic-Feasibility of Red Oak Press-Lam for Upholstered Furniture Framestock. *Forest Products Journal* 29: 21-25.
- HOOVER, W. L., ECKELMAN, C. A., RINGE, J. M. und YOUNGQUIST, J. A. 1987a. Markets for Hardwood Laminated-Veneer-Lumber. *Forest Products Journal* 37: 57-62.
- HOOVER, W. L., RINGE, J. M., ECKELMAN, C. A. und YOUNGQUIST, J. A. 1987b. Material Design Factors for Hardwood Laminated-Veneer-Lumber. *Forest Products Journal* 37: 15-23.
- HOOVER, W. L., ECKELMAN, C. A., RINGE, J. M. und YOUNGQUIST, J. A. 1988. Design and Specification of Hardwood Laminated-Veneer-Lumber for Furniture Applications. *Forest Products Journal* 38: 31-34.
- HOOVER, W. L., ECKELMAN, C. A., JOKERST, R. W., MASON, W. H. und YOUNGQUIST, J. A. 1978. Engineering and Economic-Feasibility of Producing and Utilizing Red Oak Press-Lam for Upholstered Furniture Framestock. *Indiana Agricultural Experiment Station Research Bulletin*: 1-35.
- HOPPE, M. 2005. Dämmstoffplatten aus Holzfasern. *Holztechnologie* 46: 45-49.
- HOPPELER, W. 1961. Die Spanplattenindustrie in der Schweiz. *Holz-Zentralblatt* 87(105): 1587.
- HOWALD, M. 2009a. Kronospan Schweiz AG. Persönliche Nachricht. 31.07.2009.
- HOWALD, M. 2009b. Kronospan Schweiz AG. Persönliche Nachricht. 17.09.2009.

- HSU, W. 1988. Laminated veneer lumber from aspen. Proc. of the 22nd International Particleboard/Composite Material Symposium, Washington State University 257-269.
- HÜBNER, U. 2007. Laubhölzer im Bauwesen sind noch Exoten. *Holz-Zentralblatt* 37: 980-981.
- HURST, A., MAISENBACHER, H. und ZIRKEL, R. 1989. Marktforschung Buche. Nationales Forschungsprogramm 12 "Holz, erneuerbare Rohstoff- und Energiequelle" des Schweizerischen Nationalfonds. Projekt Nr. 4.083-0.87.12, Biel.
- HURST, A., NIEMZ, P., PICHELIN, F., SEIFRIED, U. und NEHER, T. 2009. Workshop State of the Art Buche, Bericht zum Workshop vom 27. August 2009 an der Berner Fachhochschule. Bern.
- INFORMATIONSDIENST, H. 2007. Holzfaserdämmstoffe. *Holzbau Handbuch* Reihe 4/ Teil 5/ Folge 2. Absatzförderung der deutschen Forst- und Holzwirtschaft. 36p.
- KAMM, B., KAMM, M., SCHMIDT, M., HIRTH, T. und SCHULZE, M. 2006. Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In B. KammP. R. Gruber und M. Kamm [eds.], *Biorefineries - industrial processes and products status quo and future directions*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim.
- KARBUN, G. 2009. Persönliche Nachricht. 24.08.2009.
- KEHR, E. 1962a. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. 4. Mitteilung: Erle. *Holztechnologie* 3: 130-136.
- KEHR, E. 1962b. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. 3. Mitteilung: Der Einfluß des Härteranteils auf die Eigenschaften von Spanplatten aus Rotbuchen- und Kiefernholz. *Holztechnologie* 3: 22-28.
- KEHR, E. und SCHILLING, W. 1965a. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. 6. Mitteilung: Birke. *Holztechnologie* 6: 161-168.
- KEHR, E. und SCHILLING, W. 1965b. Untersuchungen über die Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente zur Herstellung von Spanplatten. 7. Mitteilung: Eiche, Aspe, Pappel, Hainbuche, Ulme, Lärche sowie als Vergleichsholzarten Fichte und Kiefer. *Holztechnologie* 6: 225-232.
- KEHR, E. 1995. Zur Verwendung schnellwachsender Holzarten für die Herstellung von MDF und Spanplatten am Beispiel von Pappel und Baumweide (1). *Holz-Zentralblatt* 60: 1010-1013.
- KLAUDITZ, W. 1952. Untersuchungen über die Eignung von verschiedenen Holzarten, insbesondere von Rotbuchenholz zur Herstellung von Holzspanplatten. Institut für Holzforschung. Braunschweig. Bericht 25/ 1952.
- KLAUDITZ, W. 1955. Entwicklung, Stand und holzwirtschaftliche Bedeutung der Holzspanplattenherstellung. *Holz als Roh-und Werkstoff* 13(11): 405-421.
- KLAUDITZ, W. und BURO, A. 1960. Untersuchungen an Spangemischen verschiedener Holzarten. Institut für Holzforschung. Braunschweig. Bericht 64/ 1960.
- KLAUDITZ, W., ULBRICHT, H. J., KRATZ, W. und BURO, A. 1960. Herstellung und Eignung von Holzspanwerkstoffen mit gerichteter Festigkeit. *Holz als Roh-und Werkstoff* 18(10): 377-385.

- KOLLMANN, F. 1940. Untersuchungen über die Herstellung von Holzwolle, insbesondere Buchenholzwolle, zu Leichtbauplatten. *Holz als Roh-und Werkstoff* 3: 33-43.
- KOLLMANN, F. 1951. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer, Berlin u.a.
- KOLLMANN, F. und SCHNEIDER, A. 1963. Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. *Holz als Roh-und Werkstoff* 21: 77-85.
- KNUST, C., HALLER, P., KRUG, D. und TOBISCH, S. 2008. Einsatzmöglichkeiten von Plantagenholz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 159: 146-151.
- KRACKLER, V., HURST, A., KEUNECKE, D., NIEMZ, P. 2010. Untersuchungen zur Verwertung von bei Laubholz anfallenden Holzresten. Abschlussbericht. Forschungsbericht für das Kuratorium des Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Nr. 2008.10.
- KRUG, D. und MÄBERT, M. 2007. MDF-Basisarbeit: Laubholz als Rohstoffalternative für Faserplatten im IHD-Test. *MDF-Magazin*: 80-85.
- LAMPERT, H. 1967. Faserplatten Rohstoffe, Herstellungsverfahren, Eigenschaften. Fachbuchverlag, Leipzig.
- LOHMANN, U. 2003. Holz-Lexikon. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen.
- LOHMANN, U. und ANNIES, T. 1998. Holz-Handbuch. DRW-Verlag, [Leinfelden-Echterdingen].
- LUTHARDT, W. 1969. Holzbewohnende Pilze Anzucht und Holzmykologie. Ziemsen, Wittenberg.
- LÜTHI, T. 2010. Analyse der Schweizer Laubholz-Sägewerke. Teilbereich der Gesamtstudie Entscheidungsgrundlagen zur Förderung von Laubholzverarbeitung und -absatz im Rahmen des Aktionsplan Holz.
- LYSSER, B. 2009. Holz: Ideal für drinnen und draussen. *Bauen&Wohnen* 15: 49.
- MAKOWSKI, M. 2003. Holzwege zum guten Wein. *Holz-Zentralblatt* 129(70): 967-970.
- MARCHETTI, V., CLEMENT, A., GERARDIN, P. und LOUBINOX, B. 2000. Synthesis and use of esterified sawdusts bearing carboxyl group for removal of cadmium(II) from water. *Wood Science and Technology* 34: 167-173.
- MARUTZKY, R. und SEEGER, K. 1999. Energie aus Holz und anderer Biomasse Grundlagen, Technik, Emissionen, Wirtschaftlichkeit, Entsorgung, Recht. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen.
- MILITZ, H. 1991. The Improvement of Dimensional Stability and Durability of Wood through Treatment with Noncatalyzed Acetic-Acid Anhydrid. *Holz als Roh-und Werkstoff* 49: 147-152.
- NIEMZ, P. 2007. Thermisch vergütetes Holz in der Schweiz. *Holz-Zentralblatt* 133: 1102.
- OELHAFEN, M. 2005. Untersuchung der Eignung der thermischen Behandlung als Methode zur Farbegalierung von Holz mit fakultativem Farbkern. Diplomarbeit Hochschule für Architektur, Bau und Holz Biel.
- OHNESORGE, D., HENNING, M. und BECKER, G. 2009. Bedeutung von Laubholz bei der Brettschichtholzherstellung. *Holztechnologie* 50: 47-49.

- OHNESORGE, D. 2009. Verklebungseigenschaften von Brettschichtholz aus Buche - Untersuchungen zur Verbesserung der Klebefugenfestigkeit und Klebefugenbeständigkeit von Brettschichtholz aus rotkernigem und nichtrotkernigem Buchenholz (*Fagus sylvatica L.*). Schriftenreihe Freiburger forstliche Forschung Band 43. Albert-Ludwig-Universität Freiburg. Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft.
- ONÍŠKO, W. und MATEJAK, M. 1971. Einfluss 25%iger Ammoniaklösung auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes. *Holztechnologie* 12: 45-54.
- OZARSKA, B. 1999. A review of the utilisation of hardwoods for LVL. *Wood Science and Technology* 33: 341-351.
- PARAMESWARAN, N. und ROFFAEL, E. 1984. Kenntnisstand und Untersuchungsergebnisse zur Wirkung von Ammoniak auf Holzspäne. *Holz als Roh-und Werkstoff* 42: 327-333.
- PATZELT, M., STINGL, R. und TEISCHINGER, A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften. in: Modifiziertes Holzeigenschaften und Märkte. Hrsg.: Teischinger, A.; Stingl, R. LIGNOVISIONEN. Institut für Holzforschung (ihf) und Verband der Holzwirte (VHÖ).
- PFRIEM, A. 2006. Untersuchungen zum Materialverhalten thermisch modifizierter Hölzer für deren Verwendung im Musikinstrumentenbau. Selbstverlag TU Dresden. Institut für Holz- und Papiertechnik, Dresden.
- PÖHLER, E., KLINGNER, R. und KÜNNIGER, T. 2004. Rotkerniges Buchenholz Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten resources, properties and utilization. EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf.
- ROWELL, R. M., LICHTENBERG, R. S. und LARSSON, P. 1992a. Stability of acetylated wood to environmental changes. *Wood and Fiber Science* 25: 359-364.
- ROWELL, R. M., LICHTENBERG, R. S. und LARSSON, P. 1992b. Stability of acetyl groups in acetylated wood to change in pH, temperature and moisture. *Forest Res Inst Bull (Eds. Plackett D V and Dunningham E A) Rotorua. New Zealand* 176: 33-40.
- SANDER, C. 2010. Edelholz aus Norwegen. *Holz-Zentralblatt* 2: 42.
- SANDERMANN, W. 1956. Grundlagen der Chemie und chemischen Technologie des Holzes. Geest & Portig, Leipzig.
- SANDERMANN, W. und DEHN, v. U. 1951. Einfluss chemischer Faktoren auf die Festigkeitseigenschaften zementgebundener Holzwolleplatten. *Holz als Roh-und Werkstoff* 9(3): 97-101.
- SANDERMANN, W. und BRENDL, M. 1956. Die "zementvergiftende" Wirkung von Holzinhaltstoffen und ihre Abhängigkeit von der chemischen Konstitution. *Holz als Roh-und Werkstoff* 14(8): 307-313.
- SANDERMANN, W. und KOHLER, R. 1964. Über eine kurze Eignungsprüfung von Hölzern für zementgebundene Werkstoffe. Studien über mineralgebundene Werkstoffe. VI. Mitteilung. *Holzforschung* 18(1/2): 53-59.
- SANDERMANN, W., PREUSSER, H.-J. und SCHWEERS, W. 1960. Studien über mineralgebundene Holzwerkstoffe. *Holzforschung* 14(3): 70-77.
- SCHEIDING, W., JACOBS, K., PLASCHKIES, K. und WEISS, B. 2007. Untersuchungen zum Einsatz von vergütetem Holz für Holzspielplatzgeräte. *Holztechnologie* 48: 45-47.

- SCHMIDT, M., GLOS, P. und WEGENER, G. 2009. Verklebung von Buchenholz für tragende Bauteile. *European Journal of Wood and Wood Products*. DOI: 10.1007/s00107-009-0382-5
- SCHNIDER, T. 2007. Eignung mittlerer Stammabschnitte aus schweizer Laubholz für neuartige Holzwerkstoffe. Diplomarbeit Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, FH, Abteilung Holz, Vertiefungsrichtung: Produkte Management PDM, 2007, AHB, Biel.
- SCHUBERT, B., WIENHAUS, O. und BLOSSFELD, O. 1990. Investigations on the Wood-Cement Composite Influence of Various Wood Species on the Setting Behavior of Wood-Cement Compounds and Possibilities of Modifying the Composite. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48: 423-428.
- SCHWAB, C. 2010. Bayerische Landesforstanstalt für Land- und Forstwirtschaft (Freising). Persönliche Nachricht. 20.04.2010.
- SCHWARZ, H.-G. und SIMATUPANG, M.-H. 1984. Eignung des Buchenholzes zur Herstellung zementgebundener Holzwerkstoffe. *Holz als Roh-und Werkstoff* 42: 265-270.
- SCHWYZER, C. 2009. Heiss begehrtes Energieholz. *Wald und Holz* 3(2009).
- ŠĆIBAN, M. und KLAŠNJA, M. 2004. Wood sawdust and wood originate materials as adsorbents for heavy metal ions. *Holz als Roh-und Werkstoff* 62(2004): 69-73.
- SEIFRIED, U. 2009. Berner Fachhochschule-Architektur, Holz und Bau. persönliche Mitteilung. 21.10.2009.
- SELL, J. und HOLZ, L. S. A. F. D. 1997. Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. Baufachverlag, Dietikon.
- SHUKLA, S. R. und KAMDEM, D. P. 2008. Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: effect of the pressure duration. *Holz als Roh-und Werkstoff* 66: 119-127.
- SIA 253. 2002. Bodenbeläge aus Linoleum, Kunststoff, Gummi, Kork, Textilien und Holz. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein Zürich.
- SIA 118/265. 2004. Allgemeine Bedingungen für Holzbau. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein Zürich.
- SIA 265. 2003. Holzbau. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein Zürich.
- SIA 265/1. 2009. Holzbau - Ergänzende Festlegungen. SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architekturverein Zürich.
- SIMATUPANG, M. H. 1975. Zur Eignung verschiedener Holzarten für die Herstellung zementgebundener Werkstoffe. *Holz-Zentralblatt* 31: 415.
- SN 166000. 2001. Prüfung fester Brennstoffe - Preßlinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung.
- STAMM, A. J. und HANSEN, L. A. 1937. Minimizing wood shrinkage and swelling Effect of heating in various gases. *Industrial and Engineering Chemistry* 29: 831-833.
- STAMM, A. J., BURR, H. K. und KLINE, A. A. 1946. Staybwood ... Heat-Stabilized Wood. *Industrial and Engineering Chemistry* 38: 630-634.
- STAMM, A. J., BURR, H. K. und KLINE, A. A. 1955. Heat-Stabilized Wood (Staybwood). Forest Products Laboratory. Wisconsin and Forest Service. U. S. Department of Agriculture.

- STEIGER, R. 2009. Sortierung von Bauholz, Vorlesung D-BAUG/ Holz- und Holzwerkstoffe, HS 2009. ETH Zürich.
- STEINER, P. R. und ANDERSEN, A. W. 1982. Effects of Veneer Preheating Temperature, Press and Assembly Time on Aspen Lvl. *Forest Products Journal* 32: 39-44.
- STRAHM, T. 2009. Neue Holzbau AG. Persönliche Nachricht. 17.09.2009.
- STUCKI, S. und WASER, A. 2006. Holz im Tank und aus dem Gashahn. *Energie-Spiegel (Newsletter des Paul Scherrer Instituts)* 16: 3.
- TARKOW, H. 1945. Decay resistance of acetylated balsa. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison. WI.
- TARKOW, H., STAMM, A. J. und ERICKSON, E. C. O. 1946. Acetylated Wood. Report 1593. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison. WI.
- THEES, O. 2009. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Persönliche Mitteilung. 15.12.2009.
- THEES, O. und LEMM, R. 2009. Management zukunftsfähige Waldnutzung Grundlagen, Methoden und Instrumente. vdf Hochschulverlag, Zürich.
- THOLE, V. 2008. Oriented Strand Boards (OSB) aus Buchenholz. *Holztechnologie* 49(6): 12-15.
- TRENDELENBURG, R. und MAYER-WEGELIN, H. 1955. <<Das>> Holz als Rohstoff. Carl Hanser, München.
- TRÜBSWETTER, T. 2006. Holz Trocknung Verfahren zur Trocknung von Schnittholz - Planung von Trockenanlagen. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München.
- URBONAS, L., HEINZ, D., KRIPPNER, R. und NIEBLER, D. 2009. Schnell erhärtender Holzleichtbeton. *Holztechnologie* 50(4): 26-30.
- VERSCHEURE, P. 1998. Energiegehalt von Hackschnitzel - Überblick und Anleitung zur Bestimmung. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Abteilung Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung, Freiburg.
- VLOSKY, R. P., SMITH, P. M., BLANKENHORN, P. R. und HAAS, M. P. 1994. Laminated Veneer Lumber - a United-States Market Overview. *Wood and Fiber Science* 26: 456-466.
- VOGT, D., CARUS, M., ORTMANN, S., SCHMIDT, C. und GAHLE, C. 2006. Wood-Plastic-Composites (WPC), 96. nova-Institut GmbH, Hürth.
- VORREITER, L. 1943. Handbuch für Holzabfallwirtschaft. Neumann, Neudamm.
- VORREITER, L. 1960. Holzmehl Eigenschaften, Erzeugung und Verwendung. Holz-Zentralblatt, Stuttgart.
- VOS, H. und KHARAZIPOUR, A. 2008. Verwendung von Küstetannen- und Buchenholz für die Herstellung neuartiger Sandwichplatten. *Holztechnologie* 49(6): 20-22.
- WAGENFÜHR, R. und SCHEIBER, C. 1974. Holzatlas. Fachbuchverlag, Leipzig.
- WAGENFÜHR, A. und SCHOLZ, F. 2008. Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, München.
- WALTER, K., KIESER, J. und WITTKE, T. 1979. Einfluss der Spanform auf einige Festigkeitseigenschaften orientiert gestreuter Spanplatten. *Holz als Roh- und Werkstoff* 37: 183-188.

- WALTHER, P. 2009. Girsberger AG. Persönliche Nachricht. 14.09.09.
- WATANUKI, Y., TADASHI, T. und DATSUO, N. 1983. Utilization of hardwood LVL as furniture stock. *Journal Japan Wood Res. Soc. (Mokuzai Gakkaishi)* 29: 375-381.
- WETZIG, M. 2009. Untersuchungen zur Optimierung der Verklebung von Laubholz. Diplomarbeit ETH Zürich, Institut für Baustoffe/ Holzphysik, Berufsakademie Sachsen/ Dresden, Zürich.
- WETZIG, M. 2010. Untersuchungen zur Optimierung der Wärmebehandlung von Holz durch Reduzierung der Emissionen. ETH Zürich/ Institut für Baustoffe. Interne Ergebnisse.
- ZELTNER, S. 1999. Schweizerische Handelsgebräuche für Rundholz, Ausgabe 2000, 41. Waldwirtschaft Schweiz.

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1: Vorratsveränderung der Gesamtschweiz zwischen LFI 2 und LFI 3 pro Produktionsregion des gemeinsamen zugänglichen Waldes ohne Gebüschwald (Brändli 2010)	11
Tab. 2.1: Zelltypen von Nadel- und Laubhölzern (Wagenführ und Scholz 2008).....	12
Tab. 2-2: Eigenschaften von Fichte, Weisstanne, Buche, Eiche und Esche (Sell und Holz 1997; Bernasconi 2004)	13
Tab. 2-3: Klebstoffe und Holzarten für Untersuchungen an verschiedenen 1K-PUR-Klebstoffen (Brandmair et al. 2010)	15
Tab. 2-4: Durchmesser-sortierung für Laubrundholz (Zeltner 1999).....	18
Tab. 2-5: Güteklassen von Laubholz (Zeltner 1999)	19
Tab. 2-6: Sortierkriterien in der Schweiz für Rund- und Schnittholz (SIA_265 2003; SIA_265/1 2009)	20
Tab. 2-7: Vor- und Nachteile der maschinellen Sortierung (Steiger 2009)	21
Tab. 2-8: Vergleich des Holzeinschlages der Schweiz, Österreichs und Deutschlands aus dem Jahre 2007 (nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft und Lebensministerium- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz)	29
Tab. 2-9: Verhältnis der nötigen Schnittleistung einiger Laubhölzer zu Fichte/Tanne (Fronius 1989a).....	30
Tab. 2-10: Schnitterzeugnisse und Ausbeuten (Fronius 1989b)	31
Tab. 2-11: Einfluss verschiedener Parameter auf die Einschnittleistung (Fronius 1989a)	33
Tab. 2-12: Definition der Güteklassen und Angabe des Schnittholzpreises (Hapla und Ohnesorge 2005)	34
Tab. 3-1: Massivholzbausysteme (Hamm und Höltschi 2005): Erne AG Holzbau, Holzhäuser Esterbauer, Gisler Holzbau, Kaufmann Oberholzer, Lignotrend Produktions GmbH, Nägeli AG, Plus Schuler AG, Sägerei Sidler AG, Schmidlin Holzbau AG, Steko-Holzbausysteme AG, Tschopp Holzbau AG	43
Tab. 3-2: Vor- und Nachteile der Holzschwelle	51
Tab. 3-3: Versuchsergebnisse der Prüfung von Fenstern aus Buche, Esche und Ahorn ohne und mit Vorsatzschalen (Berner Fachhochschule 2007).....	56
Tab. 3-4: Eigenschaften von unvergütetem und vergütetem Mykholz (Luthardt 1969).....	61
Tab. 3-5: Weitere Verwendungsmöglichkeiten für Laubvollholz	63

Tab. 3-6: Untersuchungen zum Einsatz von Laubholz in der klassischen Spanplatte (Klauditz 1952; Klauditz und Buro 1960; Buschbeck et al. 1961; Kehr 1962b; Kehr und Schilling 1965a, b; Grigoriou 1981; Vos und Kharazipour 2008)	81
Tab. 3-7: Werte für Querkzug- und Biegefestigkeit sowie Dickenquellung (DIN EN 312 2009; Grigoriou 1981).....	84
Tab. 3-8: Übersicht über Untersuchungen von mineralgebundenen Spanplatten (Sandermann und Dehn 1951; Sandermann et al. 1960; Sandermann und Kohler 1964; Simatupang 1975; Schwarz und Simatupang 1984; Schubert et al. 1990; Alpár und Rácz 2007; Urbonas et al. 2009).....	85
Tab. 3-9: Übersicht über OSB (Klauditz et al. 1960; Walter et al. 1979; Thole 2008)	88
Tab. 3-10: Anteil, Beschaffenheit und chemische Zusammensetzung der Fasern einiger wichtiger Nadel- und Laubhölzer (Autorenkollektiv 1975; Sell 1997; Lampert 1967; Wagenführ und Scheiber 1974; Trendelenburg und Mayer-Wegelin 1955).....	92
Tab. 3-11: Faserstoff- und Platteneigenschaften von HDF und MDF aus Kiefer, Buche, Eiche, Pappel und Birke nach Untersuchungen von Krug und Mäbert (2007) mit steigenden Werten von links nach rechts	94
Tab. 3-12: Ziel der Holzmodifizierung	98
Tab. 3-13: Verfahren, Wirkprinzip, Hersteller und Produktionskapazität von Thermoholz (nach IHD „Merkblatt Nr. 6 „Verfahren zur Herstellung von TMT und www.timber-online.net)	105
Tab. 3-14: Mechanische Kennmittelwerte von unbehandeltem und in Sauerstoffatmosphäre behandeltem Thermoholz aus Ahorn, Buche und Esche nach Ergebnissen von Bächle und Schmutz (2006)	107
Tab. 3-15: Chemische und mechanische Mittelkennwerte von unbehandeltem und in Wasserdampf- und Stickstoffatmosphäre behandeltem Thermoholz aus Buche, Esche und Fichte nach der ersten Behandlung von Wetzig (Wetzig 2010).....	108
Tab. 3-16: Verwertungsmöglichkeiten für Holzmehl (Vorreiter 1943; Vorreiter 1960)	114
Tab. 3-17: Formen und Anwendungen des Celluloseesters (Gutwasser 2005)	119
Tab. 3-18: Formen und Anwendungen des Celluloseethers (Fink et al. 2009).....	120
Tab. 3-19: Ausbeuten nach dem Udic-Rheinau-Verfahren (Sandermann 1956).....	121
Tab. 3-20: Verbrennungswert und Heizwert in Abhängigkeit von der Feuchte (Marutzky und Seeger 1999).....	127

Tab. 3-21: Heizwerte verschiedener Nadel- und Laubhölzer je Kilogramm, Fest-, Raum- und Schüttraummeter im Vergleich mit Heizöl und Erdgas (nach Bayerischer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2007).....	127
Tab. 3-22: Tabellarischer Überblick über die Verwendungsmöglichkeiten von Laubholz ...	129

8 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Rissbildung in Buche durch Eigenspannungen (Autorenkollektiv 2001).....	14
Abb. 2-2: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Brettschichtholz aus Buche und Hybridträger (www.waldwissen.net)	23
Abb. 2-3: Aufteilung der Holzernte 2008 in Sortimente und Holzart (nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik)	24
Abb. 2-4: Sortimente des Abfallholzes (Werte von 2008 nach Schweizerischer Forststatistik, Bundesamt für Statistik).....	26
Abb. 2-5: Überblick über Stammholzanteil sowie Schnitt- und Restholzsortimente von Nadel- und Laubholz (Autorenkollektiv 1975; Thees 2009; Krackler 2010)	27
Abb. 2-6: Abhängigkeit der Schnittholzausbeute vom Rundholzdurchmesser (Autorenkollektiv 1975).....	28
Abb. 2-7: Brett- und Dielenschnitte (Fronius 1989a; Lohmann und Annies 1998).....	31
Abb. 2-8: Kantholzschnitte (Lohmann und Annies 1998).....	32
Abb. 2-9: Schwellenschnitte (Lohmann und Annies 1998).....	32
Abb. 2-10: Rift-, Spiegel- und Fladerschnitte (Fronius 1989a; Lohmann und Annies 1998)..	32
Abb. 2-11: Relative Ausbeute in der jeweiligen Schnittholzqualität und absoluter Gesamtschnittholzerlös für 1 m ³ eingesetzten Stammholzes in Abhängigkeit vom Kernanteil am Zopfdurchmesser (Hapla und Ohnesorge 2005)	35
Abb. 2-12: Vergleich der Kalkulationsergebnisse nach Einschnittart (Hapla und Ohnesorge 2005).....	35
Abb. 2-13: Produktionskapazitäten (in Mio.m ³) der grössten Holzwerkstoffhersteller in Europa, ausschliesslich europäische Standorte (Sonae Indústria)	40
Abb. 2-14: Produktionskapazitäten (in Mio.m ³) der grössten weltweiten Holzwerkstoffhersteller (Sonae Indústria)	40
Abb.3-1: Blick in den Dachstuhl des Spittelturmes von Bremgarten mit Balken aus Eiche (Verena Krackler).....	41
Abb. 3-2: Tragende Struktur und Aussenansicht von Woodstock (www.woodstock-basel.ch; Verena Krackler)	45
Abb. 3-3: Ferienhaus Büttenhardt mit angebohrten Tragbalken aus Eiche, Architektur: bernath+widmer (Roland Bernath).....	46
Abb. 3-4: Angebohrte Eichenbalken und Verbindungsecke des Ferienheims Büttenhardt, Architektur: bernath+widmer (Roland Bernath)	46

Abb. 3-5: Fussgänger-Holzsteg aus Eichenholz zwischen Rapperswil und Hurden über den Zürichsee (Daniel Keunecke).....	47
Abb. 3-6: Fassadenschindeln der Firma Theo Ott GmbH, links: Eiche, rechts: Buche (www.holzschindeln.de).....	48
Abb. 3-7: Ferienhaus „Chesa Futura“ des Architekten Lord Norman Forster (www.arqhys.com und www.linternaute.com)	48
Abb. 3-8: Anordnung der Fassade aus Eichenbrettern der BFH-AHB (Thomas Volkmer)	49
Abb. 3-9: Detailansicht der Eichenbretter der Fassade der BFH-AHB (Thomas Volkmer)....	49
Abb. 3-10: Ansicht der Woodstockfassade mit Buchensperrholz und Photovoltaikzellen (Verena Krackler).....	50
Abb. 3-11: Konstruktion der Lärmschutzwände, links: einfach, rechts: zweiseitig (Hurst et al. 1989).....	53
Abb. 3-12: Werbung von Bauwerk für Schweizer Holz (Verena Krackler)	55
Abb. 3-13: Querschnitt eines geprüften Fensters mit Fibrex-Vorsatzschale (Berner Fachhochschule 2007).....	56
Abb. 3-14: Beispiele für Massivholzmöbel aus Laubholz. Links: Firma Benz, Kandern, Deutschland (www.schreinerei-benz.de). Rechts: Friedrich Kracke Sitzmöbel GmbH, Hülse, Deutschland (www.kracke-sitzmoebel.de)	58
Abb. 3-15: Holzbadewanne Ofuro des Designers Matteo Thun (www.matteothun.com)	58
Abb. 3-16: Saunakabine aus Buchenholz der Firma Tylö (www.tylo.com)	59
Abb. 3-17: Buchensärge (www.andres-massmann.de)	59
Abb. 3-18: Ungewöhnliche Sargmodelle der Firma Crazy Coffins (www.crazycoffins.co.uk)	60
Abb. 3-19: Produkte der Girsberger AG aus Kernbuche und -esche (Girsberger AG)	65
Abb. 3-20: Werkhalle mit BSH-Trägern aus Esche der Neuen Holzbau AG (Neue Holzbau AG).....	68
Abb. 3-21: Mit Esche verstärkter Eckanschluss der Neuen Holzbau AG (Neue Holzbau AG)	68
Abb. 3-22: Ansicht des geplanten Bürogebäudes der Bayerische Landesforstanstalt für Land- und Forstwirtschaft mit BSH-Trägern aus Buche (www.waldwissen.net)	69
Abb. 3-23: Triobalken für das Bauernhaus bei Neuenegg mit neu entwickelter Schrauben (Gautschi 2009)	72
Abb. 3-24: Klassifizierung des Sperrholzes (DIN_EN_313-1 1996)	73
Abb. 3-25: Furniersperrholz (Verena Krackler).....	74

Abb. 3-26: Aufbau und Kennwerte von Brettspertholz (pro:Holz)	75
Abb. 3-27: Kunstharz-Pressholz (Verena Krackler)	76
Abb. 3-28: Furnierstreifenholz (Verena Krackler).....	76
Abb. 3-29: Ausschnitt einer Knotenplatte aus Buchenfurnier der Hess & CO. AG (Verena Krackler).....	78
Abb. 3-30: Oberfläche einer OSB (Verena Krackler).....	87
Abb. 3-31: MDF aus verschiedenen Laubholzfaserstoffen (Krug und Mäbert2007)	95
Abb. 3-32: Anwendungsübersicht von Holzfaserdämmplatten im Holzbau (Informationsdienst 2007).....	96
Abb. 3-33: Modifizierungsverfahren von Holz (nach Gutwasser 2005).....	99
Abb. 3-34: Ring und Tischlampe aus Bendywood® (www.bendywood.com).....	101
Abb. 3-35: Behandlung von Buche (links) und Esche (rechts) bei 180 °C und unterschiedlicher Dauer. Von links nach rechts: unbehandelt, 6h, 12h, 24h (Oelhafen 2005)	106
Abb. 3-36: Thermoholz am Flughafen Kloten-Zürich (Unique, Ralph Berisberg)	109
Abb. 3-37: iwood (Verena Krackler)	113
Abb. 3-38: Schliffarten, links: Holzschliff, rechts: Hackschnitzelschliff (Gutwasser 2005). 116	
Abb. 3-39: Einfluss der Fasereigenschaften von Nadel- und Laubholz auf die Papiereigenschaften.....	117
Abb. 3-40: Im Lyocellverfahren hergestellter Vlies (Fink et al. 2009).....	119
Abb. 3-41: Aufbau der Cellulose aus Glukoseeinheiten (Gutwasser 2005)	120
Abb. 3-42: Verwendung von Lignin (Kamm et al. 2006; Bozell et al. 2007).....	122
Abb. 3-43: Wege des Holzes als Energieträger.....	123
Abb. 3-44: Verbrennungsverlauf und Energiefluss (Gutwasser 2005; Marutzky und Seeger 1999).....	126
Abb. 5-1: Mögliche Wege aus der Schweizer Laubholzabsatzkrise	137