



1 Kapitel – Einleitung

1.1 Hintergrund

Holz ist im Sinne der gesellschaftlich angestrebten Bioökonomie ein vielfältig nutzbarer, nachhaltig verfügbarer und umweltgerechter Rohstoff, der als Baumaterial und Energieträger unentbehrlich ist. Im Zuge naturnaher Waldbauprogramme werden zukünftig Laubhölzer im erhöhten Maß anfallen. Dies erfordert neue innovative Wege für die stofflichen Verwendungen und den Holzschutz. Hierdurch eröffnen sich Möglichkeiten, Wettbewerbsvorteile für heimisches Laubholz als Alternative zu biozidgeschützten, einheimischen und tropischen Holzarten zu generieren.

Aus ökologischen Gründen ist die Verwendung von natürlich gewachsenem Tropenholz nur noch bei nachhaltiger Produktion zugelassen und hiermit kaum möglich. Die Verwendung von Bioziden wird aufgrund ihrer Toxizität und problematischen Entsorgung zunehmend beschränkt. Insbesondere kleine und mittelständische Betriebe, welche die Holzverarbeitende Industrie in Deutschland dominieren, sehen sich aufgrund der zunehmenden Umweltauflagen einem steigenden Druck ausgesetzt, Biozide zu vermeiden. Insofern besteht eine Knappheit an dauerhaften Hölzern. Dies erfordert ein Umdenken und einen Anpassungsprozess der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie, wobei es zu einem vermehrten Einsatz von entsprechend behandelten heimischen Laubhölzern sowie neuen Innovationen und Nischenstrategien kommen muss (SCHMIDT 2015). Hinzu kommt, dass in deutschen Wäldern aufgrund der langfristigen ökologischen Waldentwicklung (LÖWE+) in Zukunft ein zunehmender Anteil an Laubhölzern, insbesondere Buchenhölzern, zur Verfügung steht (BAUMGARTEN & VON TEUFFEL 2005). Da die Holzverarbeitende Industrie auf die Verwendung von Nadelhölzern fokussiert ist, bestehen derzeit kaum Möglichkeiten, Laubhölzer ausreichend in deren Wertschöpfungsketten zu implementieren.

Laubholz wird aufgrund seiner funktionellen Gebrauchseigenschaften, wie z. B. der guten mechanischen Eigenschaften in Relation zu seiner geringen Dichte sowie ästhetischer Qualitäten wie Farbton und Haptik geschätzt (JANIN *et al.* 2001). Trotz weiterer positiver Eigenschaften wie hohe mechanische Festigkeiten und gute Bearbeitbarkeit weisen Laubhölzer jedoch Nachteile auf, die ihren industriellen Einsatz einschränken. Eine geringe Dauerhaftigkeit, unbefriedigende Dimensions- und Bewitterungsstabilität und vor allem die ungenügende Verfügbarkeit homogener Rohholzsortimente schränken die Verwendung erheblich ein. Ästhetische Eigenschaften werden zurzeit überwiegend durch Oberflächenbehandlungen, z. B. Beschichtungen des Holzes, erreicht, die jedoch einen mehr oder weniger dicken Film ausbilden und sowohl die natürliche Haptik als auch Optik des Holzes beeinflussen. Von den Anwendern wird aber zunehmend ein dauerhaftes, formstabiles und zudem farblich beständiges Material gefordert, bei dem die natürliche bzw. ursprüngliche Farbe, Oberflächenstruktur und Haptik des Holzes erhalten bleibt.

Um derartigen Anforderungen zu entsprechen, bedürfen die herkömmlichen Holzbehandlungs- und Holzschutzmethoden einer Entwicklung zu Verfahren, welche die oben genannten Aspekte einbeziehen. Hierzu zählt die in dieser Arbeit angewendete Imprägniermodifizierung mit eingefärbten Harzen. Unter diesem Begriff werden Verfahren zusammengefasst, bei denen die



Modifizierungschemikalien in die Hohlräume des Holzes eingelagert werden. Diese müssen in der Holzsubstanz fixiert und damit vor Auswaschung geschützt werden (HILL 2006e, S. 150 ff.). Dies bewirkt eine Optimierung der Holzeigenschaften, was wiederum zu einer Qualitätssteigerung führt und Produkte konkurrenzfähig macht.

Holz verfügt bereits von Natur aus über ein breit gefächertes Spektrum an Farbtönen, welche zu den unverwechselbaren Eigenschaften der verschiedenen Hölzer gehören. Die Färbung und Farbstabilisierung stellt eine besondere Herausforderung bei der Modifizierung von Massivhölzern dar. Aufgrund der anatomischen und wachstumsbedingten Heterogenität des Holzes variieren die Aufnahmemengen der Modifizierungsreagenzien beträchtlich (MILITZ & MAI 2008, S. 467...469). In Holzarten mit geringer Permeabilität lassen sich mit angemessenem Aufwand schwer Substanzen einbringen (EN 350-2: 1994). Auch bei höheren Molekülmassen oder unverträglichen Polaritäten der färbenden Lösungen ist die Einbringung in bestimmte Holzbereiche nicht möglich (HILL 2006e, S. 151). Holzanatomische Besonderheiten wie Drehwuchs, Äste, Früh- und Spätholz, Kernbereiche oder Reaktionsholz führen häufig zu einer unterschiedlich intensiven Lösungs- bzw. Farbaufnahme, sodass sich kein homogener Farbeindruck einstellt. Weiterhin wird das Erscheinungsbild des Holzes, z. B. durch Bewitterungseffekte wie Vergrauung und Rissbildung, negativ beeinflusst (SELL & LEUKENS 1969).

Mit den konventionellen Verfahren kann den vielfältigen ästhetischen Anforderungen an Holzprodukte parallel zu den funktionellen Anforderungen nur bedingt entsprochen werden. Die in dieser Arbeit beabsichtigte, biozidfrei herbeigeführte Verbesserung relevanter Holzeigenschaften durch die chemische Holzmodifizierung in Kombination mit farbgebenden Additiven könnte Betrieben neue Marktchancen eröffnen. Der Absatz von zukünftig vermehrt anfallenden Laubhölzern kann so nicht nur gesichert, sondern auch nachhaltig ausgeweitet werden und neue Verwendungsmöglichkeiten generiert werden.



1.2 Holz

Holz ist ein natürlicher Werkstoff mit guten Festigkeitseigenschaften im Verhältnis zu seinem Gewicht (SMITH *et al.* 2003, S. 7). Die holzartenspezifischen Eigenschaften werden von vielen Faktoren beeinflusst und können aufgrund der inhomogenen Holzstrukturen sehr unterschiedlich ausfallen. Hierbei spielen sowohl makroskopische Merkmale wie Kern- und Splintholz, Jahrringbreite oder Früh- und Spätholzanteil als auch mikroskopische Eigenschaften wie der morphologische Holzaufbau, die Zellarten und deren Verteilung eine Rolle (STAMM 1964, S. 3...4; WIEDENHOEFT & MILLER 2005, S. 9 ff; HILL 2006a, S. 19 ff; WAGENFÜHR 2007, S. 8 ff.). Die Eigenschaften von Holz werden überwiegend durch natürliche Faktoren, wie die charakteristischen Wachstumseigenschaften des Baumes und der daraus resultierenden Holzstruktur bestimmt. Generell beeinflusst der Standort von Bäumen die Eigenschaften des Holzes auf vielfältige Art und Weise. Faktoren wie Boden, Klima, Konkurrenz durch andere Pflanzen, Wildverbiss, Schadorganismen, waldbauliche Konzepte und auch die genetische Vielfalt einer Baumart innerhalb eines Wuchsgebietes sorgen für weitere Variationen und haben einen Einfluss auf den individuellen Holzaufbau (HÜBNER 2014, S. 6).

Holz setzt sich vorrangig aus Cellulose, Hemicellulosen und Lignin zusammen und ist ein heterogener, anisotroper und hygroskopischer Stoffverbund (KOLLMANN 1951, S. 124; SJÖSTRÖM 1981, S. 12). Laut PARHAM und GRAY (1984, S. 6...7) sind diese drei Biopolymere als Gerüst- und Kittsubstanzen die grundlegenden Bestandteile der Holzzellwände. Aufgrund ihrer Beschaffenheit sind diese für die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Holzes verantwortlich. Die Cellulose dient als Zellwandgerüst (Skelett) und stellt mit einem holzartenabhängigen Masseanteil von 40...50 % das im Holz vorherrschende Polysaccharid dar (SJÖSTRÖM 1981, S. 51; FENGEL & WEGENER 2003, S. 67). Auf molekularer Ebene besteht die Cellulose aus kettenförmig β -1-4-glycosidisch verknüpften Anhydro- β -D-Glucoseeinheiten (PETTERSEN 1984, S. 58). Im längs-parallelen Aufbau bilden Molekülketten (Glucanketten) über inter- und intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen sogenannte Elementarfibrillen (PARHAM & GRAY 1984, S. 24...36). Diese sind für die Steifigkeit und den Aufbau der Cellulose verantwortlich. Aus mehreren Elementarfibrillen setzt sich die sogenannte Mikrofibrille zusammen. Laut FENGEL & WEGENER (2003, S. 90 ff.) besitzen die Mikrofibrillen ca. 70 % geordnete kristalline und ca. 30 % strukturlose amorphe Bereiche. Quantifiziert werden die Molekülkettenlängen über den Polymerisationsgrad (Degree of Polymerization = DP) (PETTERSEN 1984, S. 58). Bei einheimischen Hölzern liegt der DP von Cellulose zwischen 8000...12000 (FENGEL & WEGENER 2003, S. 74...76).

Hemicellulosen haben einen artspezifischen Massenanteil von 25...35 % (PETTERSEN 1984, S. 58). Diese Polysaccharide bestehen aus unterschiedlichen, glycosidisch verknüpften Monosacchariden und bilden verzweigte Kettenmoleküle mit einem DP von 70...250 (SJÖSTRÖM 1981, S. 60; FENGEL & WEGENER 2003, S. 106 ff.). Sie sind aus vielen unterschiedlichen Pentosen (Arabinose, Xylose) und Hexosen (Glucose, Mannose) und Uronsäuren (Glucopyranuronsäure) aufgebaut (FENGEL & WEGENER 2003, S. 106 ff.). Aufgrund von zusätzlichen Verzweigungen in der Kettenstruktur zeigen die Hemicellulosen eine amorphe Molekülstruktur (SMITH *et al.* 2003, S. 12; FAIX 2008, S. 54 ff.). Hemicellulosen fungieren als Mittler zwischen den Zellwandpolymeren, da sie über Wasserstoff-

brückenbindungen mit den Cellulosefibrillen und über kovalente Bindungen mit Lignin verbunden sind (FENGEL & WEGENER 2003, S. 106 ff.).

Das dritte Biopolymer ist das Lignin, welches artspezifisch einen Anteil zwischen 20...30 % an der trockenen Gesamtholzmasse ausmacht (SJÖSTRÖM 1981, S. 69; SMITH *et al.* 2003, S. 12). Lignine sind dreidimensionale, amorphe Makromoleküle mit vorwiegend aromatischen Strukturen. Sie bestehen aus unterschiedlichen Phenylpropaneinheiten, die durch Etherbrücken oder C-C-Bindungen miteinander verknüpft sind. Es handelt sich um feste Biopolymere, die als dreidimensionale Matrix in die pflanzliche Zellwand eingelagert werden, dadurch die Verholzung der Zelle bewirken (Lignifizierung) und demzufolge das Holz stabilisieren (SJÖSTRÖM 1981, S. 79; PETERSEN 1984, S. 66...68). Im Vergleich zu Cellulose und Hemicellulosen ist Lignin hydrophob (SMITH *et al.* 2003, S. 12; SALMÉN 2004). Hierdurch kann Lignin die Dauerhaftigkeit verbessern bzw. die Holzzellwände vor biologischem bzw. enzymatischem Abbau schützen (GOLDSTEIN 1991, S. 3...4). Da einzelne Moleküle nicht isoliert werden können, ist eine Bestimmung des Polymerisationsgrades nicht möglich. Laut FENGEL und WEGENER (2003, S. 132 ff.) unterscheidet sich das Lignin der Laubhölzer (variierende Mischung zwischen Guajacyl- und Syringylpropan) und Nadelhölzer (vorwiegend Guajacylpropan). Neben den strukturbildenden Zellwandpolymeren kommt im Holz ein spezifischer Anteil an akzessorischen Bestandteilen (Begleitstoffen, Sekundärmetaboliten bzw. Extraktstoffen) vor (HILLIS 1962, S. 317 ff.; PETERSEN 1984, S. 68). Diese Stoffe, wie z. B. Tannine, Terpene, Fette, Wachse und Zucker, variieren in ihrer Zusammensetzung und Löslichkeit (PETERSEN 1984, S. 68). SJÖSTRÖM (1981, S. 68) sowie FENGEL und WEGENER (2003, S. 182 ff.) geben für heimische Hölzer einen Extraktstoffgehalt von 3...10 % an. SJÖSTRÖM (1981, S. 68) berichtet, dass bei tropischen Hölzern der Gehalt an Extraktstoffen über 15 % der Darrmasse liegen kann. Grundsätzlich sind der Aufbau der Holzzellwand und die Anordnung der Zellwandpolymere für viele Fragestellungen von Bedeutung. Die Holzzellwand dient als formgebendes Element und gibt Festigkeit bzw. Stabilität. Die Zellwand ist aus Schichten aufgebaut, die sich in der Struktur und der chemischen Zusammensetzung voneinander unterscheiden (SJÖSTRÖM 1981, S. 13).

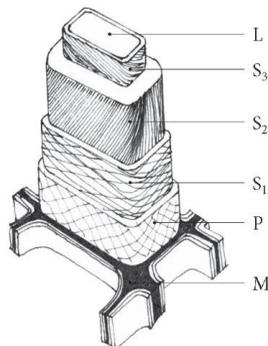


Abbildung 1.1: Schematischer Zellwandaufbau (M) Mittellamelle, (P) Primärwand, (S) Sekundärwand mit der äußeren Schicht S₁, der mittleren Schicht S₂ und der inneren Schicht S₃ und dem Lumen L (HILL 2006b, S. 23)



Dabei bilden die Mittellamelle (M), Primärwand (P) und die Sekundärwand (S₁...S₃) einen geschichteten Aufbau der Holzzellwand (vgl. Abb. 1.1) (KOLLMANN 1951, S. 121; FENGEL & WEGENER 2003, S. 15). Die Mittellamelle wird während der Zellteilung gebildet und befindet sich zwischen zwei angrenzenden Zellen (FENGEL & WEGENER 2003, S. 14). Die Mittellamelle hält den Zellverbund zusammen und besteht überwiegend aus der Matrix, einer Masse mit amorphen Strukturen, die sich aus Pektin, Hemicellulosen und Lignin zusammensetzt. An die Mittellamelle wird die dünne Primärwand angelagert. Mittellamelle und Primärwand sind schwierig zu unterscheiden und werden auch als Mittelschicht bezeichnet. In der Primärwand findet sich außer dem Matrixmaterial eine Gerüstsubstanz aus wahllos verstreut liegenden Cellulosefibrillen mit Streuungstextur, die eine hohe Formstabilität der Zelle gewährleistet (WAGENFÜHR 1999, S. 104...105). Den größten Anteil an der Zellwand nimmt die auf die Primärwand aufgelagerte Sekundärwand ein. Sie besteht aus einer äußeren (S₁-Schicht), einer zentralen (S₂-Schicht) und einer inneren Schicht (S₃-Schicht). Aufgrund ihrer Dicke, dem Cellulosegehalt sowie der Orientierung der Cellulosefibrillen unterscheiden sich die Schichten voneinander. Die Cellulosefibrillen der verhältnismäßig dünnen äußeren S₁-Schicht (50...70°) und inneren Sekundärwand S₃-Schicht (60...90°) weisen eine schwache Paralleltexur auf, wobei sie sich annähernd quer zur Längsachse der Zelle orientieren (PARHAM & GRAY 1984, S. 26...28). Die zentrale Sekundärwand (S₂) ist die stärkste Wandschicht und bildet den Hauptteil (≈ 80 %) der Gesamtzellwand. Sie ist damit entscheidend für die Holzeigenschaften verantwortlich (FENGEL & WEGENER 2003, S. 16; DINWOODIE 2010, S. 27). In der S₂-Schicht verlaufen die eng gepackten Cellulose-Fibrillen in einer flachen Spirale nahezu parallel (10...30°) in Richtung der Zellachse (parallele Schraubentextur) (WAGENFÜHR 1999, S.104...105; DINWOODIE 2010, S. 25). Die S₂-Schicht ist aus einzelnen Lamellen aufgebaut, die in ihrer Gesamtheit die größten Anteile an Cellulose, Lignin und Hemicellulosen enthalten (PARHAM & GRAY 1984, S. 51).

Holz nimmt Umgebungsfeuchtigkeit in Form von dampfförmigem und flüssigem Wasser auf bzw. gibt sie wieder ab. Grundsätzlich zeigt sich Holzfeuchtigkeit in zwei Formen, zum einen als gebundenes und zum anderen als freies Wasser (KOLLMANN 1951, S. 413; SKAAR 1984 S. 140 ff.; Hill 2006b, S. 30...34). Die Aufnahme von Feuchtigkeit ist u. a. von der Darrdichte bzw. der Porosität des Holzes abhängig (SCHRÖTER & BAUER 1964). Die Dichteunterschiede zwischen diversen Holzarten ergeben sich aufgrund des verschiedenen großen Porenvolumens, da die Zellwanddichte sämtlicher Holzarten im Durchschnitt bei ca. 1,5 g/cm³ liegt (SKAAR 1984, S. 141; PLÖTZE & NIEMZ 2011). Im trockenen Zustand weist die Zellwand nur wenige und kleine Poren auf. Diese werden durch Wasser bzw. Sorptionsvorgänge vergrößert. Laut HOFFMEYER *et al.* (2011) kann die Zellwand des darrgetrockneten Holzes etwa 40 % (wt/wt) Wasser absorbieren. Das in der Holzzellwand gebundene Wasser führt aufgrund von Ein- und Auslagerungsprozessen zu sichtbarem Quellen und Schwinden des Holzkörpers bei wechselnden Feuchtigkeitsbedingungen (KOLLMANN 1951, S. 412...414; SKAAR 1984, S. 140 ff.). Anwendungsbezogen kann das zu Verformungen und Rissen im Holz führen. Am stärksten ausgeprägt ist dieses Verhalten in tangentialer und am geringsten in axialer Richtung. Hierbei werden die Wassermoleküle durch Wasserstoffbrückenbindungen und weitere physikalische Wechselwirkungen an die Biopolymere bzw. hydrophilen Zellwandbestandteile gebunden. Die Sorption von Wasser findet größtenteils an den Hydroxygruppen der Hemicellulosen aber auch an den amorphen Bestandteilen der Cellulose und am Lignin statt. Im Holz stellt sich eine



charakteristische holzartenspezifische Ausgleichsfeuchte (Equilibrium Moisture Content, EMC) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur ein (SKAAR 1984, S. 136; ENGELUND *et al.* 2013). Bei einer relativen Luftfeuchte (rF) von nahezu 100 % entspricht die Ausgleichsfeuchte bzw. Gleichgewichtsfeuchte (EMC) dem Fiber Saturation Point (FSP) (HOFFMEYER *et al.* 2011).

Der Fasersättigungsbereich pendelt sich in Abhängigkeit von der Holzart zwischen 20...40 % Holzfeuchtigkeit ein (SIAU 1984, S. 20; HOFFMEYER *et al.* 2011). Dieser Zusammenhang zwischen der Ausgleichsfeuchte und der relativen Luftfeuchtigkeit wird durch Sorptionsisothermen dargestellt. Diese Graphen zeigen einen typischen s-förmigen Verlauf (Sigmoidfunktion) (SKAAR 1984, S. 136). Ein weiterer Anstieg der Holzfeuchtigkeit über den FSP findet nur statt, wenn sich freies Wasser im Lumen und anderen makroskopischen Poren des Holzes einlagert. Dabei wird es ausschließlich von kapillaren Kräften gehalten und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Quellung und Schwindung des Naturmaterials (SKAAR 1984, S. 140). Darüber hinaus haben Veränderungen der Holzzellwandfeuchtigkeit im Bereich zwischen absolut trocken und Fasersättigung einen entscheidenden Einfluss auf physikalische Eigenschaften des Holzes. Dabei werden mit zunehmender Menge an gebundenem Wasser in den Holzzellwänden die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Holzzellwandpolymeren erschwert bzw. dezimiert und die Festigkeiten verringert (SKAAR 1984, S. 152). Auch beim biotischen und abiotischen Abbau von Holz spielt Wasser eine entscheidende Rolle. Hierbei ist die Resistenz gegen den Holzabbau ausschlaggebend für die Dauerhaftigkeit des Holzes. In erster Linie muss die Ansiedlung bzw. das Wachstum von holzerstörenden Braunfäulen, Weißfäulen und Moderfäulen verhindert werden. Grundvoraussetzungen für die Besiedlung bzw. das Wachstum holzerstörender Pilze sind Wasser und Sauerstoff im Substrat sowie geeignete Umgebungstemperaturen und pH-Werte (ZABEL & MORELL 1992, S. 90 ff.; EATON & HALE 1993, S.45...51).

1.3 Holzaufkommen und -auswahl

Traditionell werden in der Holzindustrie überwiegend Nadelhölzer genutzt. Gründe hierfür sind vor allem die hohe Verfügbarkeit, die verhältnismäßig homogene Holzstruktur und die geringe Schwankungsbreite in den Holzeigenschaften (WELLING 2012). So betrug der Nadelholzanteil des 2011 eingeschlagenen Rohholzes (68,4 Mio m³) ca. 75 %, von denen 60 % stofflich und 15 % energetisch genutzt wurden. Der Laubholzeinschlag lag demgegenüber bei 25 %, wovon lediglich 6 % auf die stoffliche Nutzung entfielen (WEIMAR & SEINTSCH 2012). Entsprechend der ökonomischen Bedeutung des Nadelholzes wurde die Forstwirtschaft bis in die 1980er Jahre des vergangenen Jahrhunderts auf eine Erhöhung des Nadelholzanteiles umgestaltet (WELLING 2012). Mit dem Übergang zum naturnahen Waldbau in den 1990er Jahren sowie der damalig geringen Holznachfrage begann im Forst jedoch eine Abkehr vom Nadelholzanbau, so dass in der Folgezeit der Laubholzanteil in deutschen Wäldern bis heute zunimmt. Diese Entwicklung hat überwiegend ökologische und umweltpolitische Hintergründe (SPELLMANN 2013). Im Zeitraum von der 2. Bundeswaldinventur (BWI² 2002) bis zur 3. Bundeswaldinventur 2012 (BWI³) erhöhte sich in den deutschen Wäldern der Laubholzanteil um 7 %, auf ca. 43 %, während sich der Nadelholzanteil im gleichen Zeitraum um 4 % reduzierte (KÄNDLER 2015). Letzteres ist vor allem auf den Rückgang der Hauptnutzbaumart Fichte zurückzuführen: Die mit Fichten bestockte Fläche verringerte sich laut BWI³ um 8 %, der Vorrat des Fichtenholzes



nahm um 4 % ab, während der Vorrat aller übrigen Hölzer zulegen konnte. Aufgrund der seit Mitte der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zunehmenden Holznachfrage wurde die Grenze der nachhaltigen Nutzung der Holzartengruppe Fichte bereits in den Jahren 2003...2007 erreicht bzw. teilweise überschritten (DIETER 2011).

Im Unterschied hierzu besteht bei bestimmten Laubholzsortimenten aktuell ein erhebliches Nutzungspotenzial (WEIMAR & SEINTSCH 2012). Aufgrund der Anforderungen an die Hölzer, der Interessenlage der Industrie sowie der hohen Verfügbarkeit kommen zur industriellen Verwertung besonders Buchen-, Eschen- und Ahornholz in die engere Wahl.

Tabelle 1.1: Holzigenschaften ausgewählter Laubhölzer (Fengel & Wegener 2003, S. 221)

Holzart	Rohdichte	pH-Wert	Seitenhärte (Brinell)	Schwindsatz	
	[kg/m ³]			[N/mm ²]	radial [%]
Bergahorn	600 - 660	ca. 5,3	19 - 35	ca. 3,0	ca. 8,0
Esche	680 - 760	ca. 5,8	37 - 41	4,6 - 5,0	8,0 - 8,4
Rotbuche	680 - 720	5,1-5,4	ca. 34	ca. 5,8	ca. 11,8

Rotbuche (Fagus sylvatica L.)

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) ist mit einem Anteil von ca. 15 % an der Waldfläche die häufigste Laubbaumart Deutschlands. Sie ist in ganz Mitteleuropa bis hin zum Kaukasus in planarer bis subalpiner Stufe verbreitet. Im Mittelmeerraum ist sie ausschließlich in den Gebirgslagen anzutreffen (WAGENFÜHR 2007, S. 672). Die dritte Bundeswaldinventur (BWI³) ergab, dass der Vorrat an Buchenholz ca. 635 Mio. m³ beträgt. Dies entspricht 17,3 % des Gesamtholzvorrates der BRD und nimmt tendenziell zu (BMEL 2014). Der Trend wird sich fortsetzen, da viele Forstverwaltungen im Rahmen eines an ökologischen Gesichtspunkten orientierten Waldbaus einen steigenden Laubholzanteil anstreben. Hiervon wird die Rotbuche am meisten profitieren (OHNESORGE 2009). HANSEN *et. al.* (2008) berechneten auf Basis unterschiedlicher Szenarien für das Jahr 2022 ein durchschnittliches jährliches Nutzungspotenzial der Buche von 14...20 Mio. m³ o. Rinde. Im Gegensatz zu der zunehmenden Verfügbarkeit steht die geringe industrielle Nutzung des Buchenholzes. Dies verstärkt den Anstieg des Buchenholzvorrates zusätzlich. Um für das anfallende Holz wirtschaftlich befriedigende Absatzmöglichkeiten sicherzustellen, ist es erforderlich, neue Anwendungsgebiete für Buchenholz zu erschließen (SCHMIDT & GLOS 2010). Eine Besonderheit ist bei älteren Buchen (ab ca. 80 Jahren) das häufige Auftreten des Rotkerns, einer holzartenspezifischen Verfärbung im Kernbereich, die zu einer Abwertung des Stammholzes führen kann. Sie zeichnet sich durch eine dekorative, lebhaft, mehrzonige oder wolkig abgestufte rotbraune Färbung aus. Die damit verbundene Wertminderung war früher erheblich, doch dank gezielten Marketings steigt die Nachfrage für rotkernige Buchen, insbesondere im Möbel- und Parkettbereich an (OHNESORGE 2009).

Die Buche erreicht Wuchshöhen von 30 m bis 45 m bei einer astfreien Stammlänge von bis zu 20 m (WAGENFÜHR 2007, S. 672). Generell hat die Buche helles, homogen schlichtes Holz mit harter und dichter Oberfläche, die durch charakteristische Holzstrahlen gekennzeichnet ist. Die



zahlreichen kleinen Gefäße sind zerstreutporig angeordnet. (BOSSHARD 1977; WAGENFÜHR 2007, S. 672). Die Buche wird wie die Esche zu den Bäumen mit fakultativer Farbkernbildung gezählt und bildet mit zunehmendem Alter häufig einen Rotkern (Spritz- oder Wolkenkern) aus. Entsprechend ist das hellere rötlichweiße Splintholz vom unregelmäßig verlaufenden rotbraunen Falschkernholz optisch zu unterscheiden. Die Zuwachszonen sind durch gefäßarmes dichtes Spätholz mit der Lupe deutlich erkennbar und bilden auf den tangentialen Flächen eine feine Fladerung. Holzstrahlen sind in zwei unterschiedlichen Größen vorhanden und erzeugen auf den Tangentialflächen charakteristische dunkle Spindeln, die auf den radialen Flächen als deutliche Spiegel erscheinen (GROSSER & TEETZ 1998a).

Die Rohdichte des Buchenholzes beträgt ca. 0,68...0,72 g/cm³ und besteht zu etwa 53 % aus Hohlräumen. Die hohen Quell- und Schwindmaße entsprechen einer geringen Dimensions- und Formstabilität des Buchenholzes. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Buchenholzes sind in der Literatur eingehend beschrieben. Unter anderem gehen MOLNÁR *et al.* (2001), BEIMGRABEN (2002) und PÖHLER *et al.* (2004) umfassend auf die Eigenschaften des Buchenholzes ein. Hiernach verfügt Buchenholz über ausgezeichnete Festigkeitswerte, eine hohe Härte und Zähigkeit (SELL 1997, S. 35, 41). Die Buche ist für den Außenbereich wenig geeignet, da sie eine geringe natürliche Dauerhaftigkeit (Klasse 5, EN 350-2: 1994) und ein ungünstiges Quell-Schwindverhalten aufweist (WAGENFÜHR & SCHREIBER 1985, S. 428...430). Das Buchenholz gilt ferner als sehr pilz- und insektenanfällig, daher ist bei Anwendungen im Außenbereich ein unmittelbarer Holzschutz unerlässlich (WAGENFÜHR 2007, S. 673). HAPLA und MILITZ (2008) beschreiben das Holz der Rotbuche, das sich laut EN 350-2 (1994) gut mit wässrigen Lösungen tränken lässt, als ein geeignetes Material für innovative Verfahren der Holzmodifizierung. Eine langsame und schonende technische Trocknung ist möglich, wobei berücksichtigt werden muss, dass das Holz zum Reißen und Werfen neigt, da es stark schwindet (WAGENFÜHR 2007, S. 673). Die Verklebbarkeit und Oberflächenbehandlung werden als „gut“ und „ohne Schwierigkeiten“ beschrieben (WAGENFÜHR 2007, S. 673; OHNESORGE 2009).

In den letzten Jahrzehnten hat sich *Fagus sylvatica* mit rund 250 bekannten Einsatzbereichen zu der am vielseitigsten genutzten Holzart unter den einheimischen Nutzhölzern entwickelt. Ihre Hauptverwendung findet Buche als Ausstattungsholz für Möbel (u. a. Stühle, Tische, Gestelle) und wird massiv oder als Sperrholz, Formsperrholz und Formschichtholz genutzt (WAGENFÜHR 2007, S. 673). Daneben dient Buche als bevorzugtes Ausgangsmaterial im Innenausbau (insb. im Treppenbau), im Ausstattungsbereich für Wand- und Deckenverkleidungen, im Verpackungs- und Transportsektor sowie zur Fertigung zahlreicher Werkzeuge, Küchengeräte, Drechsel-, Schnitz- und Haushaltswaren und sonstiger Artikel des täglichen Gebrauchs. Das Buchenindustrieholz macht ca. 50 % des gesamten Bucheneinschlages aus und wird überwiegend von der Span- und Faserplattenindustrie sowie der Papier- und Zellstoffindustrie verarbeitet (GROSSER & TEETZ 1998a; MOMBÄCHER 1988, S. 178). Dennoch wurden Buchenholzprodukte in den vergangenen Jahrzehnten in vielen Verwendungsbereichen durch andere Holzarten, Materialien oder Werkstoffe substituiert (OHNESORGE 2009).



Bergahorn (Acer pseudoplatanus L.)

Der Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) findet eine weite Verbreitung von Mittel- und Südeuropa bis Kleinasien und im West-Kaukasus. Bevorzugte Standorte sind feuchte Täler und Schluchten, seltener Ebenen, gelegentlich Auwälder (WAGENFÜHR 2007, S. 53). Bergahorn gehört zu den wertvollsten einheimischen Edellaubhölzern und ist den zerstreutporigen Splintholzbäumen mit verzögerter Kernholzbildung zugeordnet (GROSSER & TEETZ 1998b). Der Baum erreicht eine Höhe von 20...30 m bei Mittendurchmessern bis zu 100 cm (WAGENFÜHR & SCHREIBER 1985, S. 242...244).

Sein Holz ist gelblich weiß und seidig glänzend mit homogen strukturierten und deutlich erkennbaren Jahringgrenzen sowie rötlich glänzenden Spiegeln. Es neigt unter Lichteinfluss zum Vergilben und weist zuweilen schwarze Streifen oder Flecken sowie hellbraune „Leberflecken“ auf. Eine Unterscheidung von Splint und Kern ist kaum möglich (SELL 1997, S. 19). Ahornholz ist wenig witterungsbeständig und stark farbempfindlich, außerdem pilz- und insektenanfällig und wird ebenfalls der Dauerhaftigkeitsklasse 5 zugeordnet (WAGENFÜHR 2007, S. 54). Bergahorn besitzt eine durchschnittliche Rohdichte von 0,60...0,66 g/cm³, besteht zu ungefähr 60 % aus Hohlräumen und gehört somit zu den mittelschweren Hölzern. Das Holz ist durch eine mittlere bis gute Dimensions- und Formstabilität sowie mittlere Bruchfestigkeit gekennzeichnet (SELL 1997, S. 29, 35; GROSSER & TEETZ 1998b). Sowohl Splint- als auch Kernholz werden laut EN 350-2 (1994) als problemlos tränkbar beschrieben

Aufgrund der guten Bearbeitbarkeit (profilieren, dreheln, messern, schälen) findet das Ahornholz viele Anwendungsmöglichkeiten im Möbel- und Innenausbau (Furniere, Möbelfronten, Massivholz-Küchenmöbel, Parkett). Darüber hinaus ist es im Treppenbau, in der Holzwarenindustrie (Spielwaren etc.), für Drechsler-, Schnitz- und Bildhauerarbeiten, zur Herstellung von Spulen, Walzen sowie Haus- und Küchengeräten oder als Klang- und Resonanzholz für Musikinstrumente ein geschätzter Rohstoff (GROSSER & TEETZ 1998b; LOHMANN 2003, S. 23; WAGENFÜHR 2007, S. 54).

Esche (Fraxinus excelsior L.)

Die Esche (*Fraxinus excelsior* L.) ist in fast ganz Europa bis Mittelrussland einschließlich Kaukasus und Kleinasien verbreitet und bevorzugt Niederungen und Auwälder. Ihr Verbreitungsareal entspricht dem der Stieleiche. Der Baum erreicht eine Höhe von 17...35 m bei Mittendurchmessern von 40...100 cm (WAGENFÜHR 2007, S. 279).

Das Splintholz wird als weißlich und breit beschrieben, das Kernholz hingegen als gelblich bis rötlich weiß (WAGENFÜHR 2007, S. 279). Esche ist den Kernholzbäumen mit unregelmäßiger Kernbildung bzw. Bäumen mit fakultativer Farbkernbildung zugeordnet. Im hohen Alter bildet sich häufig ein Braunkern aus, dessen Inhaltsstoffe weder biozide Eigenschaften aufweisen noch in den Zellwänden der Fasern und Gefäße eingelagert werden und somit nicht zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Holzes beitragen (BOSSHARD 1977). Die Dauerhaftigkeit des Holzes ist gering und wird ebenfalls der Klasse 5 zugeordnet (EN 350-2: 1994), jedoch ist es verhältnismäßig unempfindlich gegenüber Laugen und Säuren. *Fraxinus excelsior* zählt zu den ringporigen Laubhölzern und bildet im Frühholz zahlreiche große Gefäße aus, die vom Spätholz abgesetzt sind und somit die Jahringgrenzen deutlich hervortreten lassen (MÖHMBÄCHER 1988, S. 169; GROSSER & TEETZ 1998c). Das Eschenholz hat eine Rohdichte von 0,68...0,76 g/cm³ und besteht zu etwa 57 % aus Hohlräumen. Folglich zählt es zu den schweren Holzarten und



zeichnet sich durch gute Festigkeitswerte sowie eine hohe Elastizität und Abriebfestigkeit aus (SELL 1997, S. 36, 42). Die mechanisch-technologischen Eigenschaften hängen direkt von der Jahrringbreite ab, da breitere Jahrringe bei ringporigen Baumarten einen hohen Spätholzanteil mit sich bringen (SELL 1997, S. 15 ff.). Das Eschenholz gilt laut EN 350-2 (1994) als mäßig tränkbar.

Esche zählt zu den am häufigsten verwendeten einheimischen Hölzern im Ausstattungsbereich als Massiv- oder Furnierholz und findet weitreichende Anwendung im Möbelbau als Konstruktionsholz, als Wand- und Deckenbekleidung sowie zur Fertigung von Einbaumöbeln, Parkett, Treppen und Biegeformteilen. Breitringiges Eschenholz ist besonders gefragt, wo hohe Anforderungen an dynamische Festigkeiten und Elastizitäten gestellt werden, wie beispielsweise bei Werkzeugstielen und -griffen, Sport- und Turngeräten, Leitersprossen, Wagen-, Fahrzeug- und Waggonteilen (GROSSER & TEETZ 1998c; LOHMANN 2003, S. 321; WAGENFÜHR 2007, S. 280).

1.4 Holzmodifizierung

Da viele Holzarten die vom Verbraucher geforderten Materialeigenschaften von Natur aus nicht erfüllen, können ihre Eigenschaften durch geeignete Holzmodifizierungsverfahren angepasst bzw. optimiert werden. Die chemische Holzmodifizierung verfolgt die Absicht, definierte Eigenschaften, die sich aus dem makroskopischen, mikroskopischen und molekularen Aufbau des Holzes ergeben, über die Nutzungsdauer zu verbessern. Im Zusammenhang mit den Anwendungsmöglichkeiten von Holz wirken diverse biotische und abiotische Umwelteinflüsse. An Hölzer, die ständig wechselnden Klimabedingungen unterliegen und möglicherweise in Kontakt mit dem Erdboden stehen, werden im Allgemeinen nicht dieselben Ansprüche gestellt wie an Hölzer, die im Innenbereich Verwendung finden (EN 335-2: 2006). Etliche einheimische Holzarten weisen bei der Verwendung im Außenbereich ungünstige Materialeigenschaften auf und werden deshalb definierten Dauerhaftigkeitsklassen der EN 350-2 (1994) zugeordnet. Aufgrund anhaltender erhöhter Feuchtigkeit ist Holz empfänglich für Holzverfärbende und holzerstörende Pilze. Feuchtigkeitsschwankungen verursachen darüber hinaus Dimensionsveränderungen, die zur Bildung von Rissen führen können. Ferner wird Holz durch UV-Strahlung, Wasser sowie Pilzbefall angegriffen bzw. abgebaut und entspricht somit ggf. nicht mehr den ästhetischen bzw. optischen Anforderungen (HILL 2006b, S. 43).

Damit die aufgezählten Defizite nicht zu einer Verringerung der Holznutzung führen, sind wirkungsvolle Behandlungssysteme und Schutzmethoden unumgänglich. Die Holzindustrie versucht problematischen Produkteigenschaften bislang auf unterschiedliche Weise entgegenzuwirken. Für kritische Einsatzbereiche wird auf Alternativprodukte wie dauerhafte und dimensionsstabile tropische oder heimische Hölzer zurückgegriffen. Zusätzlich werden wenig dauerhafte Arten mit Hilfe von bioziden Holzschutzmitteln gegen den biologischen Abbau und Witterungseinflüsse geschützt. Aufgrund der Knappheit von zertifiziertem Tropenholz aus nachhaltiger Bewirtschaftung und einer eher kritischen Betrachtung der Verwendung von Tropenholz durch den Konsumenten besteht ein steigender Bedarf an modifizierten Hölzern (LANDE *et al.* 2004). Um das primäre Ziel der chemischen Holzmodifizierung, die nachhaltige Verbesserung der Dimensionsstabilität und Dauerhaftigkeit zu erreichen, ist die Einbringung der Modifizierungsmittel in die Zellwand erforderlich