

Untersuchungen zum Effekt von Dichte auf mechanische und hygrische Eigenschaften von Spanplatten und Massivholz am Beispiel von *Paulownia*

## Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)  
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

**Philipp Alexander Nelis**

geboren am 11.06.1985 in Karlsruhe

Göttingen, Dezember 2020

Mitglieder der Prüfungskommission:

1. Gutachter:

**Prof. Dr. Carsten Mai**

Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Burckhardt-Institut  
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

2. Gutachter:

**Prof. Dr. Kai Zhang**

Abteilung Holztechnologie und Holzwerkstoffe, Burckhardt-Institut  
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

Zusätzliches Mitglied der  
Prüfungskommission:

**Prof. Dr. Alireza Kharazipour**

AG Chemie und Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen, Büsgen-Institut  
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie  
Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

Tag der mündlichen Prüfung: 02.12.2020

Für meine Familie, die mich immer bedingungslos unterstützt hat – unabhängig der von mir eingeschlagenen Wege.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	III
Summary .....	IV
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>6</b>
1.1 Hinführung zum Thema .....	6
1.2 Lösungsansätze .....	8
1.3 Zielsetzungen .....	9
1.3.1 Publikation 1 .....	9
1.3.2 Publikation 2 .....	10
1.3.3 Publikation 3 .....	10
1.3.4 Publikation 4 .....	11
1.3.5 Publikation 5 .....	12
1.3.6 Charakterisierung von Kiriholz .....	12
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>14</b>
2.1 Holz .....	14
2.1.1 Betrachtungsebenen .....	14
2.1.2 Chemische Haupt- und Nebenbestandteile .....	14
2.1.2.1 Cellulose .....	15
2.1.2.2 Hemicellulosen.....	15
2.1.2.3 Lignin .....	15
2.1.2.4 Nebenbestandteile / Extraktstoffe .....	16
2.1.3 Aufbau der verholzten Zellwand .....	16
2.1.4 Eigenschaften von Holz.....	17
2.1.5 Holzeretzende Pilze .....	18
2.1.6 Branchenspezifische Daten- und Kennwerte .....	19
2.2 Holzwerkstoffe .....	19
2.2.1 Spanplatte – Übersicht und Literatur .....	20
2.2.2 Holzwerkstoffindustrie mit Bezug auf leichte Holzwerkstoffe .....	24
2.2.3 Bindemittel .....	25
2.2.3.1 Allgemein.....	25
2.2.3.2 Harnstoff-Formaldehyd-Harze .....	25
2.2.3.3 Weitere Bindemittel.....	26
2.2.3.4 Härter .....	26
2.2.4 Spanplattenherstellung im Labormaßstab.....	26
<b>3 Veröffentlichungen.....</b>	<b>30</b>
3.1 Publikation 1 .....	30

3.2	Publikation 2.....	40
3.3	Publikation 3.....	50
3.4	Publikation 4.....	58
3.5	Publikation 5.....	72
<b>4</b>	<b>Charakterisierung von Kiriholz .....</b>	<b>76</b>
4.1	Material und Methoden .....	76
4.1.1	Material .....	76
4.1.2	Trocknung.....	76
4.1.3	Bestimmung der physikalischen Eigenschaften .....	77
4.1.3.1	Bestimmung der Roh- und Darrdichte .....	77
4.1.3.2	Bestimmung des Holzfeuchte.....	77
4.1.4	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	78
4.1.4.1	Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls .....	78
4.1.4.2	Bestimmung der Zugfestigkeit.....	79
4.1.4.3	Bestimmung der Druckfestigkeit.....	79
4.1.4.4	Bestimmung des Schraubenausziehwiderstandes .....	80
4.1.4.5	Bestimmung der Bruchschlagarbeit.....	80
4.1.4.6	Bestimmung des Eindruckwiderstandes.....	80
4.1.5	Mykologische Untersuchungen.....	81
4.1.5.1	Braun- und Weißfäule.....	81
4.1.5.2	Moderfäule .....	82
4.1.6	Statistik.....	83
4.2	Anatomie des Holzes.....	84
4.2.1	Makroskopische Betrachtungsebene .....	84
4.2.2	Mikroskopische Betrachtungsebene .....	84
4.3	Physikalische und mechanische Eigenschaften .....	86
4.4	Dauerhaftigkeiten (mykologische Untersuchungen) .....	87
<b>5</b>	<b>Allgemeine Diskussion .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>Schlussbetrachtung und Ausblick.....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>Referenzen.....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>114</b>

# ZUSAMMENFASSUNG

Vor dem Hintergrund der Rohstoffverknappung für die Holzwerkstoffindustrie sowie der Konkurrenzsituation energetischer und stofflicher Nutzung von Holz, werden einige Nutzungspotentiale der schnellwachsenden Holzart Kiri (*Paulownia* spp.), welche in Europa zunehmend auf Kurzumtriebsplantagen mit dem Ziel der Wertholzerzeugung angepflanzt wird, für die Holz- und Holzwerkstoffindustrie aufgezeigt. In dieser Arbeit wurde der Effekt von Dichte auf mechanische und hygri-sche Eigenschaften von Spanplatten unter Variation der Spangemische und unter dem Einsatz von Ausgangsmaterialien unterschiedlicher Dichten in Deck- und Mittelschicht mit dem Ziel untersucht, sowohl anwendungs-bezogene als auch grundlagenorientierte Erkenntnisse zu gewinnen. Zudem wurden eine Charakterisierung von Kiriholz (*Paulownia elongata x fortunei*) im Hinblick auf physikalische und mechanische Eigenschaften, sowie mykologische Untersuchungen zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit durchgeführt.

Es wurde gezeigt, dass die schnellwachsende Holzart Kiri, welche eine geringe Dichte aufweist, zur Herstellung von Spanplatten verschiedener Dichten genutzt werden kann. Vor allem leichte Spanplatten mit Plattendichten unter  $500 \text{ kg m}^{-3}$  zeigen hervorragende mechanische und hygri-sche Eigenschaften, da trotz einer geringen Plattendichte ein hoher Verdichtungsfaktor erreicht wird, welcher für eine effizientere Bindemittelausnutzung sorgt. Die Annahme, dass aufgrund des hohen Verdichtungsfaktors große innere Spannung zu einer höheren Dickenquellung führen, wurden für Spanplatten aus Kirispänen (KS) zurückgewiesen. Durch die Beimischung von KS zu konventionell hergestellten Spanmischungen konnten die Eigenschaften, wie z.B. Biegefestigkeit oder Querzugfestigkeit der Spanplatte signifikant verbessert werden. Der Einsatz von geringen Mengen an KS zeigte die größten relativen Effekte in Bezug auf Biege- und Querzugfestigkeit. Auch durch den Einsatz von KS in Deck- oder Mittelschicht konnten Eigenschaften gezielt beeinflusst werden. Zudem können bei einer Nutzung von KS anstatt Fichtenspänen, ohne signifikante Verluste in Bezug auf Biegefestigkeit hinzunehmen, etwa 50 % Bindemittel und in Bezug auf Querzugfestigkeit etwa 30 % eingespart werden. Weiterhin konnten beim Einsatz von Hölzern mit sehr unterschiedlichen Dichten in Deck- oder Mittelschicht zur Spanplattenproduktion zwei Effekte identifiziert werden: der Dichte-Effekt (Effekt der Dichte der Holzart in der Platte) und der Verdichtungseffekt (Effekt der effizienteren Bindemittelausnutzung durch höheren Verdichtungsfaktor). Der Einfluss dieser beiden Effekte auf die mechanischen Platteneigenschaften verschiebt sich bei Veränderung der Plattendichten. Bei der Interpretation der Festigkeitseigenschaften von Spanplatten hergestellt aus Hölzern unterschiedlicher Dichten in Deck- und Mittelschicht müssen diese beiden Effekte immer berücksichtigt werden, da es sonst zu Missinterpretationen kommt.

Im Zuge der Charakterisierung von Kiriholz wurde gezeigt, dass es geringe mechanische Festigkeiten aufweist. Die Aussage, dass Kiriholz über eine besondere spezifische Festigkeit verfüge, konnte nicht bestätigt werden. Leichte Tischlerplatten aus Kiriholz konnten problemlos hergestellt werden und zeigten eine gleichmäßiger verteilte Dichte als entsprechende Referenzplatten aus Fichte. Mykologischen Untersuchungen zeigten, dass Kiriholz gegenüber Weißfäule (*Trametes versicolor*) und Moderfäule nicht dauerhaft ist, aber Braunfäule (*Coniophora puteana*) gegenüber sehr dauerhaft. Die Ergebnisse zur Resistenz gegenüber Braunfäule sollten allerdings aufgrund von Auffälligkeiten überprüft werden.

## SUMMARY

The scope of this study was to investigate the effect of density on mechanical and hygrical properties of particleboards varying particle mixtures and utilizing raw materials of different densities in surface and core layers. The objective was to gain application- and fundamentals-oriented knowledge. Furthermore, a characterization of kiri wood (*Paulownia elongata x fortunei*) was conducted, including physical and mechanical properties, as well as mycological examinations to determine its durability classes. Against the background of material shortage of wood assortments for the wood-based panel industry and the current competitive situation of energetic and material use of wood, an evaluation of the fast-growing, low-density species *Paulownia* as potential raw material for the wood and wood-based panel industry was carried out to uncover its potentials. *Paulownia* has been recognized as an excellent species for short-term cultivations on agricultural areas throughout Europe to produce quality timber.

It was shown that the low-density kiri wood can be used to produce particleboards of different panel densities. In particular light particleboards with densities of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  showed excellent mechanical and hygrical properties. Despite a low panel density, a high compaction ratio is achieved. This improves the efficiency of the glue utilization. The assumption that a higher compaction ratio leads to higher thickness swelling was rejected. The release of high stresses initiated through the compaction process during pressing was counteracted with high internal bonding between the particles. Bending strength and internal bond strength could be significantly improved through admixing of kiri particles (KP) to commonly used industrial mixtures. The use of small amounts of KP had the greatest relative effect on bending and internal bond strength. Properties could be significantly improved through usage of KP in surface or core layers. Furthermore, it was discovered that as much as 50 % of resin could be saved without reduction of bending strength and about 30 % without reducing internal bond strength when using KP instead of Norway spruce particles. Two effects, the density effect (effect of the raw material density) and the compaction effect (effect of a more efficient glue utilization due to a higher compaction ratio) could be identified when using low- and high-density wood species in surface or core layers, respectively. With changing the panel density, a shift of the occurring effects was observed. Interpreting the results of strength properties of particleboards produced by raw material of different densities in surface and core layers, these two effects must always be considered in order to avoid misunderstandings.

Within the characterization of kiri wood, generally low mechanical strength values were obtained. A statement saying that kiri shows a particularly good strength-to-weight ratio could not be verified by these results. Light blockboards with kiri wood as core layer material could be produced without problems and showed a more evenly distributed density than those with spruce wood as middle layer. Mycological examinations revealed that kiri wood is not durable against white-rot (*Trametes versicolor*) and soft-rot, but very durable against brown-rot (*Coniophora puteana*). The latter should be verified again due to conspicuous differences within the results.





# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Hinführung zum Thema

Wäldern wird in der heutigen Zeit ein großer ökologischer und ökonomischer Stellenwert zugeschrieben. Die komplexen Waldsysteme bieten uns verschiedene Funktionen wie Nutzung, Schutz, Erholung und Bildung. Dass unsere Wälder in Deutschland all diese Funktionen bereitstellen, ist kein Zufall, sondern der deutschen Forstwirtschaft zuzuschreiben. So war es Hans Carl von Carlowitz (1645 – 1714), Erfinder der forstlichen Nachhaltigkeit, welcher 1713 in seiner Schrift „*Sylvicultura oeconomica*“ erstmals formulierte, dass immer nur so viel Holz geschlagen werden sollte, wie durch planmäßige Aufforstung wieder nachwachsen kann. Somit steht Holz in bestimmten Sortimenten immerwährend zur Verfügung.

Wenn wir von der Nutzung des Waldes sprechen, ist Holz das ökonomische Hauptprodukt. Im Wesentlichen entsteht Holz aus Kohlendioxid und Wasser. Diese werden durch Sonnenenergie, unter Abspaltung von Sauerstoff in Zuckerverbindungen umgewandelt, aus denen die Bestandteile von Holz gebildet werden. Da hierbei das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid fixiert wird, gilt Holz als CO<sub>2</sub>-neutral. Die Holznutzung wird unterschieden in energetische und stoffliche Nutzung. Energetische Holznutzung erfolgt z.B. in Form von Pellets, Hackschnitzel oder Scheitholz. Holz wird hierbei zur Erzeugung von klimafreundlicher Energie eingesetzt. Die stoffliche Nutzung umfasst unter anderem die Herstellung von Zellstoff und Papier, Holzwerkstoffen und Schnittholz. Holz dient hier als Grundstoff für die Herstellung weiterer nutzbarer Materialien. Durch den Kohlenstoffsenkeneffekt der Wälder, den Kohlenstoffspeichereffekt der Holzprodukte und die Substitution von kohlenstoffintensiven Materialien wird dem Klimawandel so in dreifacher Form begegnet (Paulitsch und Barbu 2015, S. 23).

Vor dem Hintergrund einer weltweiten Verknappung des Rohstoffes Holz durch eine immer schneller wachsende Weltbevölkerung, des Preisanstiegs fossiler Energieträger und der stetigen Erweiterung und Erschließung neuer Anwendungsgebiete von Holz durch Forschung und Industrie muss die Effizienz der Nutzung stetig verbessert werden. Die Entwicklung von Holzwerkstoffen wie Span- und Faserplatten und Oriented Strand Boards (OSB) haben erheblich zu einer effizienteren Verwertung der Rohholzsortimente beigetragen. Bei der Herstellung von Holzwerkstoffen wird Holz zerkleinert und meist unter Zugabe von Bindemitteln und weiteren Additiven in einem Heißpressverfahren neu zusammengefügt. Dadurch ergeben sich gegenüber Vollholz einige entscheidende materialtechnische Vorteile: Holzwerkstoffe weisen ein homogeneres Eigenschaftsprofil auf und bestimmte Eigenschaften können während der Herstellung gezielt verändert werden, z.B. durch Hinzufügen von Additiven oder Ausrichtung der Späne. Hinzu kommt eine deutlich erhöhte Wirtschaftlichkeit von Holzwerkstoffen im Vergleich zu Vollholz aufgrund der Nutzung geringwertiger Holzsortimente und der geringeren Kosten. Allen voran hat die Entwicklung der Spanplatte seit den 1930er Jahren den wohl größten Beitrag zu einer effizienteren Nutzung des Rohstoffes Holz geleistet. Die Holzausbeute bei der Spanplattenherstellung liegt für fertig besäumte und geschliffene Platten zwischen 75 und 90 %, während sie beispielsweise bei Sperrholz nur bei 45-50 % liegt (Kollmann 1966, S. 30). Bis heute sind Spanplatten mit 32,1 Mio. m<sup>3</sup> in Europa der meist vertriebene Holzwerkstoff, vor mitteldichten

Faserplatten mit 12,14 Mio. m<sup>3</sup> und OSB mit 6,78 Mio. m<sup>3</sup> (EPF 2019). Das größte Anwendungsgebiet der Spanplatte sind Möbel.

In den letzten Dekaden hat der stetige Preisanstieg fossiler Brennstoffe sowie politisches Eingreifen im Sinne von Förderungen der Biomassenutzung durch Marktanzreizprogramme zu einer Konkurrenzsituation zwischen den Holzabnehmern der Holzwerkstoffindustrie und dem Energiesektor geführt. Das Ziel dieser Förderprogramme war es, die Biomassenutzung konkurrenzfähig gegenüber fossilen Energieträgern zu machen und gleichzeitig einen positiven Beitrag für das Klima zu leisten (Weimar et al. 2012). Der starke Anstieg der Nutzung von Holz als Energieträger hat dazu geführt, dass 2010 erstmals seit Beginn der Datenerfassung mehr Holz zur energetischen als zur stofflichen Nutzung verwendet wurde (Mantau 2012).

Weitere Herausforderungen kommen auch durch die Waldumbaumaßnahmen in Deutschland hin zu artenreicheren und stabileren Mischwäldern auf die Holzwerkstoffindustrie zu. Bisher war die Forst- und Holzwirtschaft aufgrund des schnellen und geraden Wachstums auf Nadelhölzer wie Fichte und Kiefer ausgelegt. Die Anfälligkeit der Monokulturen in Bezug auf Insektenbefall, Trockenheit und Wind hat jedoch zu einem Umdenken geführt. Die niedersächsische Landesforstverwaltung z.B. strebt an, den Laubbaumanteil auf 65 % zu steigern, wobei die heimische Buche (*Fagus sylvatica* L.) mit weiteren Begleitbaumarten wie Douglasie, Fichte und Küstentanne zu stabilen, wertholzreichen zukunftsfähigen Mischbeständen erzogen werden (Hapla und Militz 2008).

Nach Knauf und Frühwald (2015) wird die Verfügbarkeit der Holzsortimente, welche in der Holzwerkstoffindustrie verwendet werden, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in den nächsten Jahren weiterhin limitiert bleiben. Eine Möglichkeit, um den stetig steigenden Bedarf am Rohstoff Holz zu decken, ist der kontrollierte Anbau schnellwachsender Holzarten. Das Thema Plantagenholz wird seit jeher kontrovers diskutiert. Ohne Frage ist es, vom ökologischen Aspekt her, als sehr kritisch zu betrachten, wenn artenreiche und über Jahrhunderte gewachsene Ökosysteme, wie tropische Regenwälder, abgeholzt oder verbrannt werden, um Platz für Plantagenwirtschaft zu schaffen. Auch die Anfälligkeit von Holzplantagen gegenüber Kalamitäten, wie z.B. Schädlingen oder Stürmen, ist nicht von der Hand zu weisen. Diesen sehr offensichtlichen Nachteilen stehen ebenso offensichtliche Vorteile gegenüber, wie eine bessere Planbarkeit aufgrund eines weniger komplexen Systems, gleichbleibender Pflegeaufwand, erhöhte Wirtschaftlichkeit oder um die weltweit steigende Nachfrage bedienen zu können. Eine spezielle Form des Anbaus von Holz in Plantagen ist das Anlegen von Kurzumtriebsplantagen (KUP) auf ursprünglich landwirtschaftlich genutzten Flächen. KUP sind nicht als Wald definiert, solange sie mit dem Ziel der baldigen Holzentnahme angepflanzt werden und die Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben (BWaldG 2020). Eine mehrzyklische Nutzung ist jedoch nicht ausgeschlossen. In Deutschland werden vor allem die schnellwachsenden Baumarten, wie Pappel und Weide, als KUP angepflanzt. Im Vergleich mit den klassischen Ackerkulturen lassen sich einige ökologische und ökonomische Vorteile festhalten wie z.B. extensivere Bewirtschaftung von KUP, geringerer Einsatz von Herbiziden, Verringerung des Boden-Erosionsrisikos oder auch eine Biotop- und Lebensraumvernetzung.

In Deutschland dienen die meisten KUP zur Herstellung von Energieholz. Es ist jedoch auch möglich, auf KUP Wertholz zu erzeugen, z.B. mit der Holzart *Paulownia*.



Abbildung 1-1: Kiri-Kurzumtriebsplantagen nach 3 Monaten (links) und 9 Jahren (rechts) zur Erzeugung von Wertholz

*Paulownia* gehört zur Ordnung der Lippenblütlerartigen (Lamiales), Familie Paulowniaceae und umfasst eine Gattung und sechs Arten (Olmstead et al. 2009). Die bekannteste und am weitesten verbreitete Art in Deutschland ist *Paulownia tomentosa*, der Blauglockenbaum. Weitere Handelsnamen sind Kiri, Paulownie oder Kaiserbaum. In dieser Arbeit wird hauptsächlich der Name Kiri verwendet. Ursprünglich kommt Kiri aus Ost-Asien (Hu 1961) und bereits seit 2000 Jahren wird der Baum in China kultiviert (Barton et al. 2007, S. 5). In Europa ist Kiri das erste Mal im Jahr 1834 wahrgenommen worden (Rein 1889, S. 281). Die Holzart gilt als außerordentlich schnellwachsend (Hu 1961; Zhu et al. 1986, S. 1; Flynn und Holder 2001, S. 397). Jahrringe können in den ersten Wuchsjahren bis zu 5 cm breit werden. Unter optimalen Bedingungen können sie eine Höhe von 25 m und Durchmesser zwischen 60 und 120 cm (Flynn und Holder 2001, S. 396) erreichen und eine erste Holzernte kann, ein gutes Plantagenmanagement vorausgesetzt, bereits nach nur 5 Jahren erfolgen (Zhu et al. 1986, S. 14), wobei Umtriebszeiten von 10 bis 14 Jahren empfohlen werden (Stearns 1944). Das Holz besitzt eine Dichte zwischen  $264 \text{ kg m}^{-3}$  und  $347 \text{ kg m}^{-3}$  (Zhu et al. 1986, S. 59), je nach Standort- und Wuchsbedingungen, ist weich, ringporig, mit geradem Faserverlauf und besitzt einen satinartigen Schimmer (Flynn und Holder 2001, S. 396). Yadav et al. (2013) und He et al. (2016) geben eine Übersicht über viele der Einsatzgebiete der Gattung *Paulownia*, welche neben einer klassischen Holznutzung noch bestehen. Eine Zusammenfassung in Form eines phytochemischen Profils von *Paulownia tomentosa* haben Schneiderová und Šmejkal (2015) angelegt.

## 1.2 Lösungsansätze

Die Rohstoffverknappung von Holz aufgrund diverser Faktoren (siehe Kap. 1) ist eine der großen Herausforderungen, mit welcher sich die Holzwerkstoffindustrie konfrontiert sieht. Es gibt unterschiedliche Herangehensweisen, um sie zu bewältigen. Die Substitution klassischer zum Einsatz kommender Holzarten, wie Fichte oder Kiefer, wird bereits seit einigen Jahren verfolgt. Diese kann durch ein komplettes oder teilweises Ersetzen des Rohstoffes Holz durch alternative Rohstoffe (Çöpür et al. 2007; Balducci et al. 2008; Garay et al. 2009) geschehen oder durch eine Bereitstellung des Rohstoffes Holz in größeren Massen bzw. in kürzerer Zeit, z.B. durch den Einsatz von schnellwachsenden Baumarten wie Pappel (Roffael und Dix 1988) oder Kiri (Clad und Pommer 1980). Die Nutzung von Holzarten mit geringer Dichte zur Herstellung von Spanplatten wirkt sich aufgrund des höheren Verdichtungsfaktors positiv auf die Festigkeitseigenschaften aus (Kelly 1977). Mit Bezug auf die Spanplatte ist eine weitere Herangehensweise die Reduzierung der Rohdichte (Clad 1982), welche jedoch,

bei gleichbleibendem Material, von fallenden Festigkeitseigenschaften begleitet wird. Diese Problematik lässt sich einfach erklären: wenn bei gleichbleibender Dicke der Platte weniger Material verwendet wird, entstehen größerer Räume zwischen den Poren und die Anzahl der festigkeitsbildenden Klebeflächen zwischen den einzelnen Spänen sinkt. Um eine starke Abnahme der Festigkeitseigenschaften zu vermeiden, müssen die entstehenden Porenräume so klein wie möglich gehalten werden. Hierfür können z.B. Schäume aus unterschiedlichen Materialien (Shalbfan 2013), Rückstände aus landwirtschaftlicher Produktion (Scatolino et al. 2013), Popcorn aus Mais (Burnett und Kharazipour 2018) oder auch Späne von Holzarten mit geringer Dichte verwendet werden (Roffael und Dix 1988; Hegazy et al. 2010; Rofii et al. 2013; Rahman et al. 2019).

## 1.3 Zielsetzungen

Der Einsatz von schnellwüchsigen Holzarten kann einen Teil dazu beitragen der Rohstoffverknappung entgegenzuwirken. Die Ziele und Forschungshypothesen, wie sie in Kap. 1.3.1 - 1.3.4 beschrieben werden, dienen dem übergeordneten Ziel, die Auswirkungen der Nutzung einer Holzart mit geringer Dichte, am Beispiel von Kiri, als Rohstoff für leichte Spanplatten zu evaluieren, sowohl in reiner Form, als auch in verschiedenen Mischungsverhältnissen mit anderen Holzarten. Kap. 1.3.5 und 1.3.6 befassen sich mit Kiri als Vollholz, wobei in Kap. 1.3.5 Kiri als potentiell Material für die Mittelschicht in leichten Tischlerplatten evaluiert wird und in Kap. 1.3.6 eine Charakterisierung von Kiriholz, welche die Erhebung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften, sowie die Einstufung in Dauerhaftigkeitsklassen umfasst, durchgeführt wird.

### 1.3.1 Publikation 1

#### **Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards?**

Autoren: Philipp A. Nelis, Franz Michaelis, Kim C. Krause & Carsten Mai  
 Journal: European Journal of Wood and Wood Products 76:445–453  
 Jahr: 2018  
 DOI: 10.1007/s00107-017-1222-7

Das Ziel dieser Studie ist es, die allgemeine Einsetzbarkeit von Kiriholz als Material für die Spanplattenherstellung zu testen. Hierfür werden Einschicht-Spanplatten, basierend auf Spänen aus Kiriholz, mit verschiedenen Dichten produziert und deren mechanische und physikalische Eigenschaften mit denen herkömmlicher Spanplatten aus Industriespänen verglichen. Um den Materialverbrauch so gering wie möglich zu halten, wurde ein besonderer Fokus auf die Herstellung leichter Spanplatten gesetzt und verschiedene Mischungsverhältnisse getestet. Letzteres ist von besonderer Wichtigkeit, da die Verfügbarkeit von Kiriholz in Deutschland noch sehr begrenzt ist. Folgende Forschungshypothesen werden getestet:

- 1-i. Aus einer Holzart mit geringer Dichte lassen sich Spanplatten mit sowohl sehr geringen Plattendichten von 350 und 500 kg m<sup>-3</sup> als auch einer mittleren Plattendichte von 650 kg m<sup>-3</sup> herstellen.
- 1-ii. Spanplatten aus einer Holzart mit geringer Dichte weisen höhere Festigkeiten auf als herkömmliche Spanplatten.

- 1-iii. Je höher der Anteil der Holzart mit geringer Dichte in der Spanplatte ist, desto höher sind auch die Festigkeitseigenschaften.
- 1-iv. Dickenquellung und Wasseraufnahme erhöhen sich durch den Einsatz einer Holzart mit geringer Dichte.
- 1-v. Der Formaldehydgehalt der Spanplatten aus der Holzart mit geringer Dichte oder mit Anteilen dieser ist ähnlich wie bei den Referenzspanplatten.

### 1.3.2 Publikation 2

#### **Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.)**

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
Journal: European Journal of Wood and Wood Products 77:761–769  
Jahr: 2019  
DOI: 10.1007/s00107-019-01442-7

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Publikation 1 (siehe Kap. 3.2) wird in dieser Studie der Fokus auf die industrienahe Herstellung von Dreischicht-Spanplatten gesetzt. Hierbei werden verschiedene Deck- und Mittelschichten sowohl aus reinen Kiri- und Industriespänen als auch aus Mischungen von Kiri- und Industriespänen verwendet und deren Effekt auf verschiedene Eigenschaften untersucht. Folgende Forschungshypothesen werden getestet:

- 2-i. Biegefestigkeit und -E-Modul wird bei gleicher Mittelschicht durch den Einsatz einer Holzart mit geringer Dichte in der Deckschicht erhöht.
- 2-ii. Querkzugfestigkeit wird nicht durch die Deckschicht beeinflusst, jedoch durch den Anteil einer Holzart mit geringer Dichte in der Mittelschicht.
- 2-iii. Dickenquellung und Wasseraufnahme werden reduziert durch Einsatz einer Holzart mit geringer Dichte in der Deckschicht.
- 2-iv. Schraubenauszieh Widerstand wird durch einen höheren Anteil einer Holzart mit geringer Dichte am Spangemisch erhöht.
- 2-v. Spanplatten mit der geringsten Dichte in der Mittelschicht weisen die niedrigste Querkzugfestigkeit auf.

### 1.3.3 Publikation 3

#### **The influence of low-density (*Paulownia* spp.) and high-density (*Fagus sylvatica* L.) wood species on various characteristics of light and medium-density three-layered particleboards**

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
Journal: Wood Material Science & Engineering  
Jahr: 2019  
DOI: 10.1080/17480272.2019.1659850

Das Hauptziel dieser Studie ist es, Dreischicht-Spanplatten mit Spänen einer schnellwachsenden Baumart mit geringer Holzdichte und einer langsam wachsenden Baumart mit hoher Holzdichte herzustellen. Hierfür werden Deck- und Mittelschichten jeweils aus Buche (*Fagus sylvatica* L.) als Holzart

mit hoher Dichte und Kiri (*Paulownia* spp.) als Holzart mit geringer Dichte verwendet. Es werden die mechanischen Eigenschaften dieser vier Varianten ermittelt und anhand der Rohdichteprofile interpretiert. Folgende Forschungshypothesen werden getestet:

- 3-i. Beim Einsatz einer Holzart mit hoher Dichte und einer Holzart mit geringer Dichte, in jeweils Deck- oder Mittelschicht, wirkt sich die effizientere Bindemittelausnutzung aufgrund eines höheren Verdichtungsfaktors (Verdichtungseffekt) der Holzart mit geringer Dichte stärker auf Festigkeiten aus als der Effekt der Holzdichte (Dichte-Effekt) einer Holzart mit erheblich höherer Holzdichte für Spanplatten mit Plattendichten von 500 und 650 kg m<sup>-3</sup>.
- 3-ii. Der Verdichtungseffekt der Holzart mit geringer Dichte in der Deckschicht wirkt sich stärker auf die Biegefestigkeit aus als der Dichte-Effekt der Holzart mit hoher Dichte für Spanplatten mit Plattendichten von 500 und 650 kg m<sup>-3</sup>.
- 3-iii. Der Verdichtungseffekt der Holzart mit geringer Dichte in der Mittelschicht wirkt sich stärker auf die Querkzugfestigkeit aus als der Dichte-Effekt der Holzart mit hoher Dichte für Spanplatten mit Plattendichten von 500 und 650 kg m<sup>-3</sup>.
- 3-iv. Die Festigkeitseigenschaften sind in ähnlichem Maße von der Änderung des Verdichtungsfaktors abhängig.

#### 1.3.4 Publikation 4

##### **Effects caused by admixing of different amounts of kiri particles to low-density spruce particleboards at different adhesive contents**

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
 Journal: Wood Material Science & Engineering  
 Jahr: Eingereicht beim Verlag 09.08.2020  
 DOI: Noch nicht vergeben

Nachdem nachweislich festgestellt wurde, dass der Einsatz von Kirispänen (KS) zu höheren mechanischen Festigkeiten führt, ist es Ziel dieser Studie zu überprüfen, inwieweit durch Zumischungen von KS der prozentuale Bindemittelgehalt gesenkt werden kann, ohne eine Verringerung der mechanischen Festigkeiten in Kauf nehmen zu müssen. Folgende Forschungshypothesen werden getestet:

- 4-i. Eine Erhöhung der Festigkeitseigenschaften der Spanplatte durch Zumischung einer Holzart mit geringer Dichte erfolgt linear.
- 4-ii. Eine Erhöhung des Bindemittelanteils verringert den Effekt der effizienteren Bindemittelausnutzung einer Holzart mit geringer Dichte im Vergleich zu herkömmlichen Fichtenspänen.
- 4-iii. Durch den Einsatz einer Holzart mit geringer Dichte anstatt herkömmlicher Fichtenspäne kann Bindemittel eingespart werden, ohne die mechanischen Eigenschaften zu reduzieren.

### 1.3.5 Publikation 5

#### **Comparison of blockboards with core layers made of kiri (*Paulownia* spp.) and of spruce (*Picea abies*) regarding mechanical properties**

Autoren: Philipp A. Nelis, Olaf Henke, Carsten Mai  
Journal: European Journal of Wood and Wood Products 77, 323–326  
Jahr: 2019  
DOI: 10.1007/S00107-019-01381-3

Ziel dieser Studie ist es eine sehr leichte Tischlerplatte mit einer Mittelschicht aus Kiriholz herzustellen und sie in einigen mechanischen Festigkeiten mit einer herkömmlichen Tischlerplatte mit einer Mittelschicht aus Fichtenholz zu vergleichen. Folgende Forschungshypothese wird getestet:

- 5-i. Festigkeitseigenschaften und Gewicht bei Tischlerplatten mit einer Mittelschicht aus einer Holzart mit geringer Dichte sind geringer als die von Tischlerplatten mit einer Mittelschicht aus einer Holzart mit höherer Dichte.

### 1.3.6 Charakterisierung von Kiriholz

In Kap. 4 erfolgt eine Beschreibung anatomischer Merkmale von Kiriholz auf makro- und mikroskopischer Ebene, sowie eine Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften und mykologische Untersuchungen zur Bestimmung der Dauerhaftigkeitsklassen. Folgende Forschungshypothese werden getestet:

- 6-i. Kiriholz weist geringe Festigkeitswerte aufgrund der geringen Dichte auf.
- 6-ii. Kiriholz weist geringe Dauerhaftigkeiten in Bezug auf holzerstörende Pilze auf.
- 6-iii. Kiriholz besitzt eine hohe spezifische Festigkeit.





## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zusammengefasst und vorgestellt. Kap. 2.1 befasst sich mit dem Thema Holz, wobei auf dessen Struktur, Aufbau und chemische Zusammensetzung eingegangen wird, wie auch auf Holzabbau durch Weiß-, Braun- und Moderfäule und der Nennung einiger wichtiger branchenspezifischer Daten. In Kap. 2.2 wird auf Holzwerkstoffe eingegangen mit besonderem Bezug auf die Spanplatte und den Leichtbau.

### 2.1 Holz

Als Holz bezeichnet man die entrindeten Stämme, Wurzeln und Äste der Bäume und Sträucher (Kollmann 1951a, S.1). Biologisch gesehen ist es ein durch Kambiumtätigkeit erzeugtes Dauergewebe (Wagenführ und Wagenführ 2008, S. 14), welches aus sehr verschiedenartigen Zellen besteht, die im lebenden Gewächs die Aufgaben der Wasserleitung, Transport und Speicherung von Nährstoffen und der Festigung übernehmen (Richter 2015, S. 3-5). Es werden Laub- und Nadelhölzer unterschieden, wobei die zeitgeschichtlich jüngeren Laubhölzer (Stinglwagner et al. 2005, S. 1008) einen komplexeren Aufbau als die Nadelhölzer aufweisen (Butterfield 2006, S. 1-5). Der hierarchisch-strukturierte Aufbau auf makroskopischer, mikroskopischer und submikroskopischer Ebene ist jedoch bei allen Hölzern gleich und definiert die übergeordneten Werkstoffeigenschaften (Stamm 1964, S. 3).

#### 2.1.1 Betrachtungsebenen

Bei der Betrachtung von Holz werden drei Ebenen unterschieden: makroskopisch, mikroskopisch und submikroskopisch. Auf makroskopischer Ebene wird Holz als Dauergewebe aus verschiedenen Zelltypen beschrieben, welche den Hauptgewebetypen (Leit-, Speicher- und Festigungsgewebe) zugeordnet sind, die für die Hauptfunktionen des Baumes (siehe Kap. 2.1) verantwortlich sind: man unterscheidet Früh- und Spätholz, Kern- und Splintholz, Längsparenchym, Mark, etc. (Kollmann 1951a, S. 1-10; Wagenführ und Wagenführ 2008, S. 14-47). Auf mikroskopischer Ebene wird die Morphologie der Zelltypen, welche sich in Form, Größe und Anordnung erheblich unterscheiden können, beschrieben, ebenso wie Zellverbindungen (Tüpfel), Interzellulärgänge, mineralische Einschlüsse, etc. (Wagenführ 1999, S. 53-103). Auf submikroskopischer Ebene wird der Aufbau der Zellwand und Zellwandschichten (Kollmann 1951b, S. 120-124; Wagenführ 1999, S. 103-109), sowie die chemische Zusammensetzung beschrieben (Kollmann 1951b; Rowell et al. 2005; Faix 2012).

#### 2.1.2 Chemische Haupt- und Nebenbestandteile

Die Hauptbestandteile von Nadel- und Laubhölzern sind die Gerüstsubstanzen Cellulose, Hemicellulosen und Lignine, aus welchen die Zellwände aufgebaut sind, wo hinzu noch wechselnde Mengen an Holzinhaltsstoffen (Lohmann und Blosen 2010, S. 212) als Nebenbestandteile kommen (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubholz der gemäßigten Zone. <sup>1</sup> bezogen auf extraktfreies Holz (atro), <sup>2</sup> bezogen auf gesamtes Holz (atro) (Lohmann und Blosen 2010, S. 212)

	Holz	Cellulose <sup>1</sup>	Hemicellulose <sup>1</sup>	Lignin <sup>1</sup>	Extraktstoffe <sup>2</sup>	Asche <sup>2</sup>
Nadelholz [%]		~ 42–49	~ 24–30	~ 25–30	~ 2–9	~ 0,2–0,8
Laubholz [%]		~ 42–51	~ 27–40	~ 18–24	~ 1–10	~ 0,2–0,8

Während im stehenden Baum der Hauptbestandteil Wasser ist, bestehen Holzzellwände hauptsächlich aus zuckerbasierten Polymeren (Kohlenhydrate 65-75 %) und Lignin (18-30 %). Trotz der stofflichen Unterschiede, besitzen alle Hölzer eine nahezu gleiche elementare Zusammensetzung: 50 % Kohlenstoff, 44 % Sauerstoff, 6 % Wasserstoff und Spuren von anorganischem Material (Rowell et al. 2005, S. 36; Lohmann und Blosen 2010, S. 212). Letzteres entspricht dem Ascheanteil in Tabelle 2-1.

### 2.1.2.1 Cellulose

Cellulose ist die am meisten vorkommende organische Verbindungen auf der Welt (Rowell et al. 2005, S. 37). Sie basiert auf linearen Ketten von Anhydro- $\beta$ -D-Glucose-Einheiten (AHG). Die einfachste strukturelle Untereinheit der Cellulose ist die Glucankette. Die kleinste sich wiederholende Einheit der Kette wird als dimere Anhydro-Cellobiose beschrieben und bildet den fundamentalen Baustein der Glucankette. Erst durch Zusammenlagerung mehrerer Glucanketten über intramolekulare und intermolekulare Wasserstoffbrücken zu Elementar- bzw. Mikrofibrillen, auch Agglomeration genannt, entsteht Cellulose. Die Mikrofibrillen sind das primäre verstärkende Element in der Zellwand und aufgrund ihrer kristallinen Struktur dafür verantwortlich, dass die Cellulose in Holz verhältnismäßig unreaktiv und thermisch stabil ist (Hill 2006, S. 25-26). Eine wichtige Kenngröße für Cellulosen ist der Polymerisationsgrad (DP, Degree of polymerisation), welcher die durchschnittliche Anzahl an AHG-Einheiten angibt (Faix 2012, S. 54). Aus Holz können im Durchschnitt Cellulosen mit DP-Werten zwischen 9000-10000 isoliert werden (Rowell et al. 2005, S. 37). Die Cellulose dient bei der Biosynthese als Templat für die Hemicellulosen (Faix 2012, S. 56).

### 2.1.2.2 Hemicellulosen

Die Variabilität von Hemicellulosen ist groß. Sie bestehen aus diversen Anhydrohexosen (Glucose, Mannose, Galactose), Anhydropentosen (Xylose, Arabinose) sowie Anhydrouronsäuren (Glucuron-, Galacturonsäure), werden in die Gruppe der Glucomannane und Xylane eingegliedert und umgeben räumlich die Cellulose-Mikrofibrillen. Eine hohe Wasseraufnahme und Quellung werden gefördert durch lediglich geringe Maskierung der OH-Gruppen. Daher sind sie um den Faktor 1,6 hydrophiler als Cellulose. Sperrige Seitengruppen führen zu einer überwiegend amorphen Molekülstruktur. Ihnen wird daher (hydrophile amorphe Polymere) u.a. eine klebende Wirkung im Holz zugeschrieben. Im Vergleich zu Cellulose haben die Hemicellulosen alle niedrige DP-Werte (< 1000). Die Hemicellulosen dienen wiederum als Template für die nachfolgende Lignifizierung (Rowell et al. 2005, S. 39-43; Faix 2012, S. 54-57).

### 2.1.2.3 Lignin

Lignine sind amorphe, hochkomplexe, überwiegend aromatische Polymere in Form von Phenylpropanoiden (Rowell et al. 2005, S. 43), welche mit den Hemicellulosen eng verschränkt sind. Das Lignin

gehört neben der Cellulose und den Hemicellulosen zu den am häufigsten vorkommenden Naturstoffen (Lohmann und Blosen 2010, S. 765). Die Ligninbausteine Guajacyl-Rest (G-Lignin), Syringyl-Rest (S-Lignin) bzw. 4-Hydroxyphenyl-Rest (H-Lignin), welche im Zuge der Lignifizierung der Zellwand aus den Ligninvorstufen Coniferylalkohol, Sinapylalkohol und 4-Hydroxy-zimtalkohol gebildet werden, sind zu 50-60 % über  $\beta$ -Arylether miteinander verbunden. Als Quervernetzung zwischen den vorgebildeten Ligninketten dienen C-C- und C-O-Bindungen (Faix 2012, S. 61). Während die Laubhölzer aus unterschiedlichen Mengen von Guajacyl- und Syringylpropanen (GS-Lignine) bestehen, weisen Nadelhölzer bis zu 90 % Guajacylpropane (G-Lignine) auf. Nach der Biosynthese der Polysaccharide, lignifizieren sich die Zellwände, auch Verholzung genannt. Das Lignin ist für die Druckfestigkeit des Holzes verantwortlich (Faix 2012, S. 58-64). Es besitzt einen höheren Kohlenstoff- (60 % Laubholz, 63 % Nadelholz) und geringeren Sauerstoffanteil (30-33 %) als die Hemicellulosen und Cellulose, auf welche das Gegenteil zutrifft (Lohmann und Blosen 2010, S. 212).

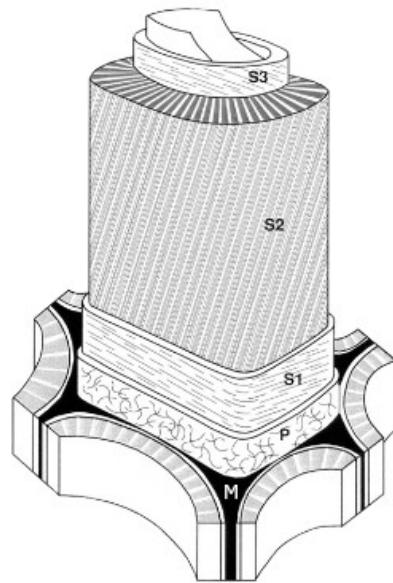
#### 2.1.2.4 Nebenbestandteile / Extraktstoffe

Als Nebenbestandteile (auch akzessorische Bestandteile oder Holzinhaltstoffe) des Holzes gelten organische und anorganische Verbindungen, welche innerhalb der Hohlräume der extrazellulären Matrix oder in den Zelllumina eingelagert sind (Faix 2012, S. 64). Teilweise werden sie auch als Extraktstoffe bezeichnet, wobei nicht alle Holzinhaltstoffe extrahierbar sind (Lohmann und Blosen 2010, S. 568). Global gesehen umfassen sie einen Anteil von 0,5 bis 20 % nach Gewicht (Hill 2006, S. 25), variieren je nach Holzart, Splint- und Kernholz, Varietät, Provenienz, Standort, Stammhöhe und Alter (Faix 2012, S. 65) und sind gekennzeichnet durch hohe Mobilität (Marra 1992). Sie bedingen zudem Eigenschaften von Hölzern wie Farbe, Geruch, Giftigkeit und Resistenz gegenüber Pilz- und Insektenbefall (Stinglwagner et al. 2005, S. 444) und Dimensionsstabilität.

Man unterscheidet zwischen primären und sekundären Inhaltsstoffen. Als primäre Inhaltsstoffe bezeichnet man die organischen und anorganischen Verbindungen, welche für die Physiologie des Baumes grundlegend sind. In lebenden Zellen sind mehrheitlich Lipide (Fette und Öle), Lipoide (Wachse) und Polysaccharide (Zucker und Stärke) enthalten. Für den Aufbau von organischer Substanz, sowie für den Stoffwechsel des Baumes sind Makro- und Mikroelemente bedeutend. Diese Makroelemente sind in abnehmender Reihenfolge im Holz vertreten: Calcium > Kalium > Magnesium > Mangan. Die metallischen Mikroelemente sind zum einen als Ionen, als negative Ladung an das Holz gebunden. Zum anderen treten sie als Salze der Kohlen-, Schwefel-, Phosphor-, Salz-, Kiesel- und Oxalsäure in Form von Carbonaten, Sulfaten, Phosphaten, Chloriden, Silikaten und Oxalaten auf. Der Mineralstoffgehalt wird durch Verbrennung von organischem Material ermittelt. Die sekundären Inhaltsstoffe werden im Zuge der premortalen Biosynthese (bei der Verkernung) als Endprodukte freigesetzt, welche der Abwehr von Mikroorganismen dienen und meistens im Kernholz abgelagert sind. Hierzu zählen Isoprenoide (Terpene, Steroide), Phenole und Gerbstoffe, Chinone und Strukturproteine. Sie tragen essentiell zur natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz bei (Faix 2012, S. 64-74).

#### 2.1.3 Aufbau der verholzten Zellwand

Charakteristisch für den Aufbau der Holzzellwand bei Tracheiden und Libriformfasern ist die Zusammensetzung aus verschiedenen Schichten (Kollmann 1951b, S. 121; Wagenführ 1999, S. 104). Die unterschiedlichen Schichten der Zellwand (Abbildung 2-1) haben unterschiedliche Funktionen:



- S3 = Innere Sekundärwand
- S2 = Zentrale Sekundärwand
- S1 = Äußere Sekundärwand
- P = Primärwand
- M = Mittellamelle

Abbildung 2-1: Zellwandmodell (verändert nach Zimmermann und Sell 1997)

Die Mittellamelle besteht aus amorphen Substanzen, u.a. aus kohlehydratfreiem Lignin und Pektin, und wird als Interzellulärschicht bzw. Kittsubstanz bezeichnet, welche aneinander liegende Zellen miteinander verbindet (Wagenführ 1999, S. 104). Die Primärwand weist neben der Matrix eine Gerüstsubstanz aus Cellulosefibrillen auf, wobei der Celluloseanteil, welcher nur bei ca. 2,5 % der Gesamtsubstanz liegt, und die Fibrillen, welche verstreut überwiegend quer zur Zellachse der Zelle verlaufen, charakteristisch für diese Zellwandschicht sind (Schwarze et al. 2011, S. 25). Mittellamelle und Primärwand sind zusammengefasst als Mittelschicht, da sie sehr schwer voneinander zu unterscheiden sind. Die mechanische Eigenschaft der Mittelschicht besteht darin, der Zellwand Druckfestigkeit und Steifigkeit zu verleihen (Booker 1996). Die Sekundärwand ist in eine äußere (S1), zentrale (S2) und innere Lamelle (S3) gegliedert. S1 liegt an der Primärwand und ist ca. 0,25 µm dick, weshalb sie auch als Primärlamelle bezeichnet wird. Der Mikrofibrillenwinkel beträgt etwa 60-80° zur Längsachse (geringe Steigung). S2 bildet mit einer Dicke von 1-10 µm den Hauptteil der Zellwand und wird auch Zentralschicht genannt. Charakteristisch für diesen Teil der Zellwand sind ein geringer Fibrillenwinkel (starke Steigung) und Ligningehalt. S3, auch als Abschlusslamelle bezeichnet, bildet bei einer Dicke von 0,5 bis 1 µm und einem Fibrillenwinkel von 60-90° (geringe Steigung) die Abschlusschicht zum Zelllumen (Kollmann 1951b, S. 121-124; Wagenführ 1999, S. 104-107; Wiedenhoft und Miller 2005, S. 18-19).

#### 2.1.4 Eigenschaften von Holz

Holz ist ein anisotroper, inhomogener und poröser Werkstoff, dessen Eigenschaften richtungsabhängig (longitudinal, tangential, radial) sind, sehr stark variieren und abhängig von Umweltbedingungen sind (Niemz und Sonderegger 2017, S. 36-38). Gemäß Abbildung 2-2 können die Eigenschaften in drei Teilgebiete unterteilt werden: chemisch (siehe Kap. 2.1.2 und 2.1.3), physikalisch und biologisch (siehe Kap. 2.1.5).

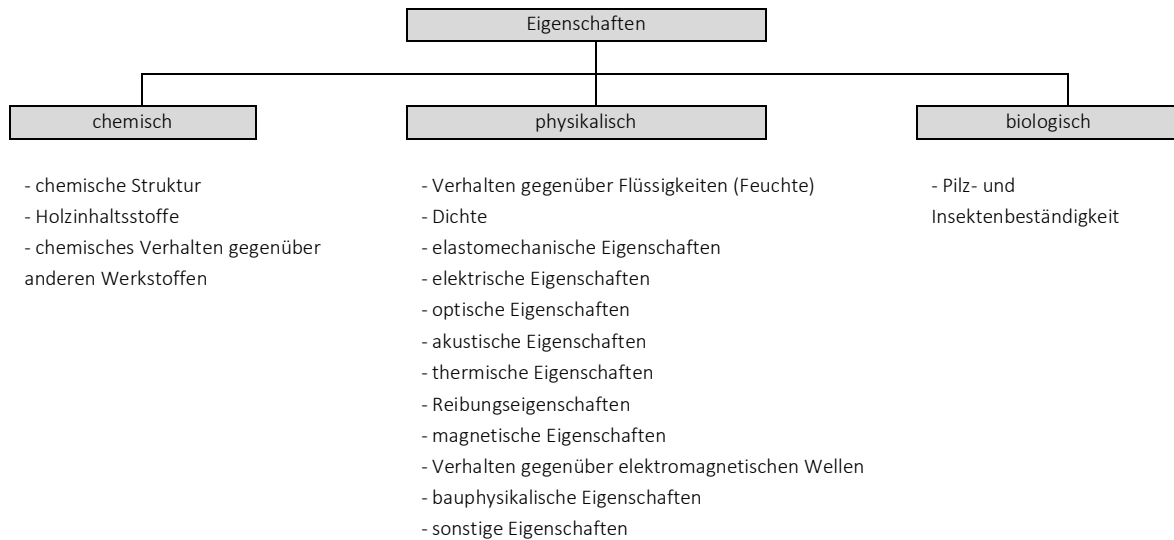


Abbildung 2-2: Systematik der Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen (verändert nach Niemz und Sonderegger 2017, S. 36)

Die Holzfeuchte spielt eine besondere Rolle, da Holz ein kapillarporöser Werkstoff ist. Aufgrund seines strukturellen Aufbaus werden nahezu alle Eigenschaften des Holzes, insbesondere unterhalb des Fasersättigungsbereich, durch die Holzfeuchte beeinflusst. Man unterscheidet drei Grenzzustände. Das Holz wird als darrtrocken bezeichnet, wenn kein Wasser mehr im Holz vorhanden ist. Fasersättigung ist erreicht, wenn das Hohlräumensystem in den Zellwänden mit Wasser gefüllt ist. Unter Fasersättigung wird von gebundenem Wasser gesprochen und darüber von freiem Wasser. Sind das gesamte Mikro- und Makrosystem des Holzes (Zelllumina, Hohlräume in Zellwänden) maximal mit Wasser gefüllt, spricht man von Wassersättigung. Holz quillt und schwindet in tangentialer Richtung am stärksten und in longitudinaler Richtung am geringsten (Niemz und Sonderegger 2017, S. 69). Eine weitere wichtige Eigenschaft von Holz ist, dass es ein viskoelastisches System darstellt, sprich Festigkeiten und Verformungen von Holz sind zeitabhängig. Kurzzeitige Belastungen bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze sind vollständig reversibel. Langfristige Krafteinwirkungen oder das Überschreiten der Proportionalitätsgrenze führen hingegen zu einer irreversiblen plastischen Verformung (Smith et al. 2003, S. 37-65 u. S. 25-33).

### 2.1.5 Holzersetzung Pilze

Es gibt drei Arten von Holzfäulen: Weiß-, Braun- und Moderfäule. Weißfäule wird hauptsächlich von Basidiomyceten und seltener auch von Ascomyceten hervorgerufen (Schmidt 2006, S. 138). Weißfäuleerreger bauen sowohl Cellulose und Hemicellulosen, als auch Lignin ab. Der Abbau kann selektiv und simultan erfolgen. Bei der selektiven Weißfäule erfolgt erst ein Abbau des Lignins, später erst folgt der Abbau von Cellulose. Bei der simultanen Weißfäule, wie z.B. *Trametes versicolor*, erfolgt der Abbau von Kohlenhydraten und Lignin in ähnlichem Maße in allen Phasen der Zersetzung (Messner et al. 2003, S. 77). Das Holz nimmt im Laufe des Befalls eine weißlich gebleichte Färbung an. Braunfäule wird ausschließlich durch Basidiomyceten verursacht (Schwarze et al. 2011, S. 37). Braunfäulepilze zersetzen im Wesentlichen Cellulose und Hemicellulosen und können bis zu einem gewissen Grad aber auch Lignin modifizieren (Eriksson et al. 1990, S. 43). Befallenes Holz kennzeichnet sich durch eine Braunfärbung des Holzes aufgrund des weitestgehend erhaltenen Lignins, einem würfelförmlichen Zerbrechen des Holzes, und nach der Zersetzung lässt sich das Holz zwischen den Fingern

zu Pulver zerreiben (Schwarze et al. 2011, S. 37). Bei der Moderfäule werden, wie bei der Braunfäule, hauptsächlich Cellulose und Hemicellulosen abgebaut. Verursacht wird sie hauptsächlich von Ascomyceten und Deuteromyceten (Eriksson et al. 1990, S. 56). Moderfäulepilze können auch unter extremen Bedingungen wie hoher Wassersättigung und niedrigem Sauerstoffgehalt Holz abbauen (Schmidt 2006, S. 145). Das angegriffene Holz wirkt modrig-weich. In direktem Erdkontakt ist das Risiko eines Moderfäulebefalls von Holz erheblich erhöht. Durch unterschiedliche Holzabbaustrategien wird die Moderfäule in zwei Typen unterschieden (Corbett 1965), welche einzeln oder auch gleichzeitig auftreten können (Nilsson 1973). „Typ 1“ kennzeichnet sich durch die Ausbildung von hintereinander aufgereihten Kavernen, die innerhalb der S2-Schicht der Richtung der Mikrofibrillen folgen (Savory 1954). Zusätzlich zur Ausbildung der Kavernen erfolgt die Zersetzung bei „Typ 2“ vom Lumen nach außen durch die Bildung kleiner Erosionsgräben in Form von v-förmigen Kerben (Corbett 1965).

Die Ergebnisse aus verschiedenen Studien geben keine eindeutigen Ergebnisse in Bezug auf die Resistenz gegen holzersetzende Pilze. Während Pohleven und Petric (1997) Kiriholz eine exzellente Dauerhaftigkeit gegenüber Braun- und Weißfäule nachgewiesen haben, zeigten Akcay et al. (2020), dass Kiriholz nicht dauerhaft gegenüber Braun- und Weißfäule ist. Kirker et al. (2013a) wiederum wiesen nach, dass Kiriholz gegenüber Braunfäule dauerhaft ist und moderat dauerhaft gegenüber Weißfäule. Einige Autoren zeigten, dass Kiriholz nicht dauerhaft gegenüber Weißfäule ist und versuchten die Dauerhaftigkeit durch verschiedene Behandlungen zu erhöhen (Akhtari et al. 2013; Akhtari und Arefkhani 2013; Akhtari und Ganjipour 2013; Kirker et al. 2013b; Ghorbani und Asghari 2016; Akcay et al. 2020). Kirker et al. (2012) zeigten, dass Kiriholz gegenüber Moderfäule nicht dauerhaft ist. Olson und Carpenter (1985) weisen nach, dass junges Kiriholz durchschnittlich 13 % Extraktstoffe besitzt, was im Vergleich zu anderen schnellwachsenden Holzarten ein hoher Wert ist.

### 2.1.6 Branchenspezifische Daten- und Kennwerte

Die folgenden Daten entstammen der aktuellsten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2012 (BWI 2014). Der Wald nimmt in Deutschland 32 % der Gesamtfläche ein, was einer Waldfläche von 11,4 Mio. ha entspricht. Trotz steigender Nutzung des Rohstoffes Holz wird in den Wäldern mehr Holz produziert als später genutzt. Die Hauptbaumarten in deutschen Wäldern sind Fichte (26,0 %), Kiefer (22,9 %), Rotbuche (15,8 %) und Eiche (10,6 %). Sie stehen auf 73 % der bewaldeten Fläche. Der Anteil der Laubbäume beträgt 43 % und ist gegenüber 2002 um ca. 7 % gestiegen, wohingegen der Anteil der Nadelbäume um ca. 4 % gesunken ist.

## 2.2 Holzwerkstoffe

Es werden unterschiedliche Gruppen von Holzwerkstoffen eingeteilt (Abbildung 2-3). Charakteristisch für alle Holzwerkstoffe ist, dass mit zunehmender Zerkleinerung des nativen Holzes eine weitgehende Homogenisierung der Eigenschaften der aus den Strukturelementen hergestellten Werkstoffe erfolgt (Niemz und Sonderegger 2017, S. 41). Zudem beeinflussen Größe und Form der Holzpartikel und die Bindemittelwahl die Eigenschaften des Holzwerkstoffs entscheidend. Die Anforderungen an die Holzqualitäten sind je nach Holzwerkstoff sehr unterschiedlich. Je kleiner die Holzpartikel sind, aus welchen ein späterer Holzwerkstoff hergestellt wird, desto geringer sind die Anforderungen an die Holzqualität. So bedarf es für eine Spanplatte einer geringeren Holzqualität, als für einen Brettschichtholzträger.

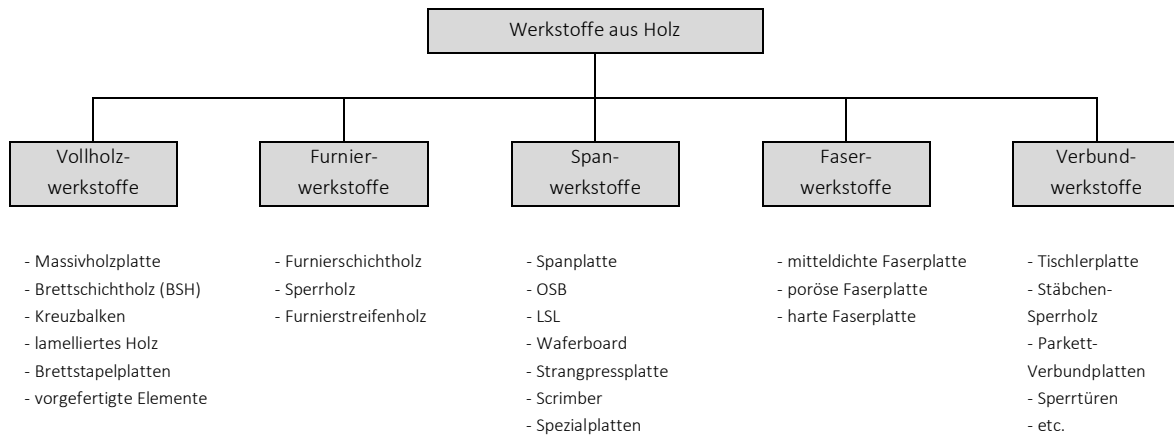


Abbildung 2-3: Einteilung von Werkstoffen aus Holz nach strukturellem Aufbau (verändert nach Niemz und Sonderegger 2017, S. 41)

### 2.2.1 Spanplatte – Übersicht und Literatur

Der Erschaffung des „künstlichen“ Bretts, wie Wyss (1981) es genannt hat, ging die Grundidee voraus, den allgemeinen Nutzungsgrad von Bäumen zu erhöhen, sowie Holzabfälle, welche bei der Herstellung anderer Holzprodukte entstehen, zu nutzen. Nachdem in den 1930er Jahren an Vorläufern der Spanplatte geforscht wurde, stellt Wyss (1981) klar, dass die Entwicklung der Spanplatte als vollwertiger, holzähnlicher Werkstoff, sowie für die Entstehung der Spanplattenindustrie unmittelbar nach dem zweiten Weltkrieg vor allem durch die Ideen, Patente und unternehmerische Dynamik der Fahrni-Institut AG und der Behr-Homogenholz-Gruppe, bestehend aus einem Zusammenschluss des Möbelfabrikanten Erwin Behr und der Forschungsgruppe Himmelheber-Wyss, entstanden ist. In Deutschland ergab sich seit den Anfängen der Spanplattenproduktion um 1950, abgesehen von konjunkturellen Rückschlägen, ein ständiger Aufwärtstrend (Deppe und Ernst 2000, S. 2). Im Jahr 2007 wurde ein Rekord von 10,86 Mio. m<sup>3</sup> produzierten Spanplatten in Deutschland erzielt, wohingegen der Trend in den folgenden Jahren zu niedrigen Produktionszahlen führte. Nach aktuellsten Zahlen wurden im Jahr 2018 6,99 Mio. m<sup>3</sup> Spanplatten in Deutschland hergestellt (Statista 2020). Für die Herstellung von Spanplatten werden getrocknete Späne unterschiedlicher Größen beleimt und heiß zu einem plattenförmigen Werkstoff verpresst, wobei es zu unterschiedlichsten Interaktionen zwischen material- und prozessspezifischen Faktoren kommt, welche die Platteneigenschaften beeinflussen (Abbildung 2-4). Wimmer et al. (2011) weisen darauf hin, dass es bis dato quantitativ nur wenige Daten dazu gibt, welche diese Interaktionen und Abhängigkeiten im Detail erklären.

Des Weiteren sind sie meist mehrschichtig aufgebaut (drei- bis fünfschichtig), wobei die äußeren Schichten aus feinerem Material als die Mittelschichten bestehen, um eine möglichst homogene Oberfläche zu erschaffen. Neben Sägenebenprodukten und Waldhölzern kommt zunehmend Gebraucht Holz für die Herstellung von Spanplatten zum Einsatz (VHI 2020). Die Hauptabsatzgebiete sind Möbelbau, Innenausbau und Bauwesen.



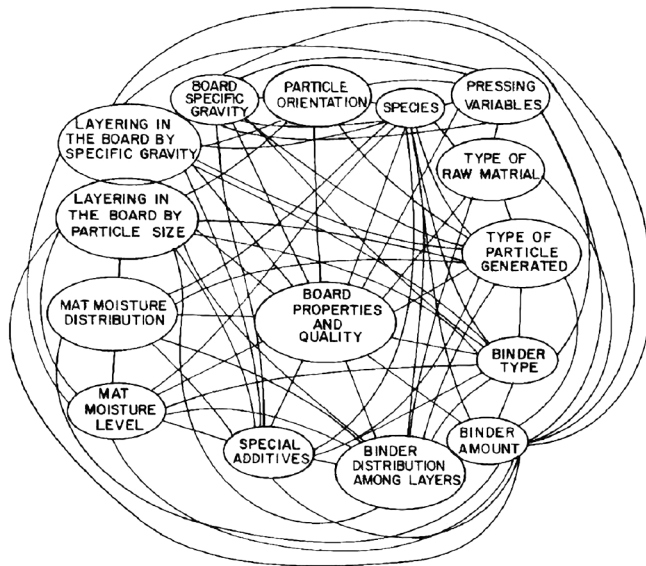


Abbildung 2-4: Interaktionsmodell sich gegenseitig beeinflussender Faktoren bei der Herstellung von Spanplatten (Maloney 1993, S. 159)

#### Einfluss der Plattendichte auf Eigenschaften der Spanplatte

Die Plattendichte nimmt unter den verschiedenen Faktoren, welche Eigenschaften einer Spanplatte beeinflussen, eine besondere Stellung ein, da die meisten Eigenschaften in einer bestimmten Weise mit der Rohdichte der Platte verknüpft sind. Nicht gesicherte Korrelationen zwischen Plattendichte und Platteneigenschaften weisen darauf hin, dass andere technologische Parameter wie Spanform und -orientierung, Feingutanteil oder Beleimungsgrad ebenfalls großen Einfluss haben, wobei diese nicht notwendigerweise zu einer Dichteänderung führen (Dunky und Niemz 2002, S. 894). Eine Erhöhung der Plattendichte führt dazu, dass die Biegefestigkeit und -E-Modul steigen (Kehr und Schilling 1965; Niemz und Schweitzer 1990; Niemz und Bauer 1991), die Querkzugfestigkeit steigt (May 1983a; Schulte und Frühwald 1996; Wong et al. 1999), die Abhebefestigkeit steigt (Kehr und Schilling 1965; Niemz und Bauer 1990), der Schraubenauszieh Widerstand steigt (Eckelman 1975; Niemz und Bauer 1990), die Wasseraufnahme sinkt (Neusser et al. 1960; Dunky et al. 1981) und die Dickenquellung nach 24 Stunden steigt in den meisten Fällen, jedoch sind die Ergebnisse nicht einheitlich (Klauditz et al. 1958; Kehr und Schilling 1965; Stewart und Lehmann 1973; Wang und Lam 1999). Dies zeigt, wie anfangs erwähnt, dass neben der Plattendichte andere Faktoren ebenfalls einen starken Einfluss auf die Dickenquellung haben müssen. Bei höheren Plattendichten erfolgt nach Parameswaran und Roffael (1982) eine Steigerung der Verleimungsgüte aufgrund einer besseren Verleimung des Spanguts infolge des dichteren Aneinanderliegens der Späne, verbunden mit einer breitflächigeren Verteilung des Bindemittels.

#### Einfluss der Holzart auf Eigenschaften der Spanplatte

Nach Kehr und Schilling (1965) war es Wilhelm Klauditz, welcher 1952 erstmalig in zusammengefasster Form Ergebnisse von Untersuchungen zur Eignung verschiedener Holzarten zur Spanplattenherstellung veröffentlichte, wobei Spanplatten aus Pappelholz die höchste Biegefestigkeit erreichten. In FAO (1958) wurde die Rohdichte des Holzes schon als die Variable bestimmt, welche Eigenschaften der Spanplatte am stärksten beeinflusst. Kehr und Schilling (1965), sowie Neusser und Zentner (1974)

führten ebenfalls umfangreiche Untersuchungen zur Eignung verschiedener Holzarten und -sortimente durch. Stegmann et al. (1965) evaluierten Pappelholz als Rohstoff für die Spanplattenindustrie und führten die hohe Biegefestigkeit auf den hohen Verdichtungsfaktor der Pappelspäne zurück. Erste deutsche Untersuchungen zur Herstellung von Spanplatten aus Kiriholz wurden von Clad und Pommer (1980) durchgeführt und zeigten, dass auch unter einer Plattenrohddichte von  $450 \text{ kg m}^{-3}$  noch sehr hohe Festigkeiten durch den Einsatz von Kirispänen erzielt werden. Kalaycioglu et al. (2005) analysierten die chemischen Eigenschaften von Kiriholz und stellten aus selbigem Holz Spanplatten verschiedener Plattendichten ( $550$  und  $650 \text{ kg m}^{-3}$ ) her. Die Werte aller getesteten Festigkeitseigenschaften übertrafen die in den entsprechenden EU-Normen geforderten Mindestwerte. Weitere Studien zur Verwendung schnellwachsender Holzarten für die Herstellung von Spanplatten wurden von Roffael und Dix (1988), Buchholzer (1992), Hegazy und Aref (2010) und Rahman et al. (2019) durchgeführt.

Vital et al. (1974) führten Untersuchungen zu verschiedenen Mischungsverhältnissen einiger exotischer Laubhölzer unterschiedlicher Dichten durch, u.a. Kiri, und schlussfolgerte, dass es möglich ist, mit verschiedenen Mischungsverhältnissen Spanplatten unterschiedlicher Dichten mit akzeptablen Eigenschaften herzustellen. Mit Bezug auf den Einfluss verschiedener Holzarten, u.a. Pappel, auf die Eigenschaften dreischichtiger Spanplatten und deren Deckschichten, stellte Grigoriou (1981) ausführliche Untersuchungen an und kam zu dem Ergebnis, dass die Qualität der Deckschicht vorwiegend durch die Holzart bestimmt wird. Poblete (1992) wies anhand einige chilenischer Hölzer ebenfalls nach, dass die Holzart, sowie auch Holzartenmischungen die Festigkeiten der hergestellten Spanplatten direkt beeinflussen. Weigl et al. (2008) und Wimmer et al. (2011) beschäftigten sich mit dem Einsatz von Spanmischungen verschiedener europäischer Laub- und Nadelhölzer zur Herstellung einschichtiger Spanplatten und deren Effekten. Rofii et al. (2013) untersuchten zum einen, inwiefern Verarbeitungsreste aus einer Möbelfabrik, welche unter anderem Holzreste hoher und niedriger Dichte beinhalteten, zur Spanplattenproduktion geeignet sind und evaluierten zudem den Effekt von Spanmischungen verschiedener Holzarten auf die Platteneigenschaften. Lengyel et al. (2018) beeinflussten durch eine Veränderungen der Laub- und Nadelholzanteile in Spangemischen die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Spanplatten mit reduzierter Dichte ( $580 \text{ kg m}^{-3}$ ), wobei dies durch die Dichtereduzierung verursachten Abfalls der Festigkeitseigenschaften mit einem isocyanat-basierten Additiv entgegenwirkt wurde. Wimmer et al. (2011) stellten heraus, dass, gerade aufgrund der Rohstoffverknappung, noch wesentlich stärker auf die möglichen positiven Effekte durch Holzarten und -qualitäten geachtet werden muss und die Holzwerkstoffindustrie den Vorteil der großen Vielfalt an Holzarten und -qualitäten sehen, erforschen und nutzen sollte.

#### Beurteilung von Eigenschaften der Spanplatte anhand der Rohdichteprofile

Keylwerth (1958) war der Erste der Spanplatten als ein Mehrschichtelement betrachtete, wobei die Dichte jeder Schicht einen hohen Einfluss auf die Mechanik der Spanplatte hat. Plath (1963) befasste sich mit dem Thema, in welchem Maße die Korrelation zwischen Rohdichte und Festigkeit von Holz auf Holzwerkstoffe übertragen werden kann und bezieht sich im genauen auf Biege- und Querkzugfestigkeit. Plath und Schnitzler (1974) kategorisierten das Rohdichteprofil einer Spanplatte als aufschlussreiches und leicht messbares Beurteilungsmerkmal für die gesamte Verfahrenstechnik und

gingen im Detail auf das Rohdichteprofil beeinflussende Faktoren wie Struktur der Spanvliese, Steuerung der Presse und Einflüsse der Verleimung ein. Sie wiesen außerdem einen engen Zusammenhang zwischen Rohdichteprofil und Querkzugfestigkeit nach, indem sie eine Korrelation zwischen Querkzugfestigkeit und der an der Bruchstelle vorliegenden Rohdichte aufstellten. Während die Rohdichteprofile von Plath und Schnitzler (1974) noch auf Proben basierten, welche mit dem Sägeverfahren erzeugt wurden, zeigten Ranta und May (1978) die Messung von Rohdichteprofilen an Spanplatten mittels Gammastrahlen. Mit dieser Methode wies May (1983a) die starke Korrelation ( $r = 0,93$ ) zwischen mittlerer Dichte und Querkzugfestigkeit und May (1983b) den Zusammenhang zwischen Dichtemaximum und Biegefestigkeit und -E-Modul. May und Roffael (1982) wiesen Beziehungen zwischen Maximaldichte des Rohdichteprofiles und Dickenquellung sowie Wasseraufnahme nach. Boehme (1986) bestätigte diese Ergebnisse und fand, dass bei gleicher mittlerer Rohdichte die Dickenquellung bei Laborspanplatten mit „steilem“ Profil nach zweistündiger Wasserlagerung um 41 % und nach 24-stündiger Wasserlagerung um 18 % gegenüber identischen Platten mit „flachem“ Profil reduziert werden konnten. Kruse et al. (1996) beschreiben die höchste Korrelation zwischen Querkzugfestigkeit und RohMin4-Wert, welcher die mittlere Rohdichte in einem Bereich von 4 % der Plattendicke um das Rohdichteminimum beschreibt, wohingegen die Korrelation von mittlerer Rohdichte und Querkzugfestigkeit niedrigere Werte auswies. Schulte und Frühwald (1996) hingegen bestätigen die Ergebnisse von May (1983a) und wiesen ebenfalls einen engen Zusammenhang ( $r = 0,81$ ) zwischen mittlerer Dichte und Querkzugfestigkeit nach. Eine generelle Aussage zu den Korrelationen zwischen mittlerer oder minimaler Rohdichte des Dichteprofiles und der Querkzugfestigkeit können sie jedoch nicht machen, da Korrelationen sehr abhängig von Produktions- und Produktparametern, wie Art- und Menge des Bindemittels, Spandimensionen, Holzart, Verdichtungsfaktor, Feuchtigkeit im Spankuchen und den Einstellungen der Presse sind. Wong et al. (1999) befassten sich ebenfalls mit Beziehungen zwischen der mittleren Rohdichte, dem Rohdichteprofil und physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Spanplatten. Nemli und Demirel (2007) untersuchten die Beziehung zwischen Dichteprofil und einigen physikalischen und mechanischen Eigenschaften, wobei Faktoren wie Pressentyp, Heiß- oder Kaltpressvorgang und Feuchtegehalt der Späne mit einbezogen wurden.

#### Einfluss des Bindemittelgehalts auf die Platteneigenschaften

Kollmann et al. (1955) und Lehmann (1970) belegten anhand empirischer Studien, dass mit einer Erhöhung des Bindemittelgehalts die Biegefestigkeit bis zu einem bestimmten Beleimungsgrad steigt. Später bestätigten sowohl Niemz und Schweitzer (1990) als auch Niemz und Bauer (1991) die Ergebnisse anhand eigener Versuche. Arabi et al. (2011) beschrieben, dass der Abnahme an Biegefestigkeit verursacht durch eine Verringerung der Plattendichte oder des Bindemittelgehalts durch Beeinflussung des Schlankheitsgrads der Späne entgegengewirkt werden kann, wobei sich der Schlankheitsgrad negativ auf die Querkzugfestigkeit auswirkt. Kollmann et al. (1955) untersuchten weiterhin, dass mit steigender Beleimung auch der Biege-E-Modul steigt, was durch Niemz und Bauer (1991) bestätigt wurde. Die Wasseraufnahme nach 2 und 24 Stunden sinkt mit steigendem Beleimungsgrad (Kollmann et al. 1955) und die Dickenquellung nach 2 und 24 Stunden ebenso (Lehmann 1970).

### Zusammenfassende Literatur

Werke, welche den zum Erscheinungszeitpunkt aktuellen Wissensstand zum Thema Holzwerkstoffe (u.a. Spanplatten) zusammenfassend behandeln, sind in unterschiedlichen zeitlichen Abständen erschienen. Hierzu zählen Kollmann (1966), Maloney (1993), Dunky und Niemz (2002) und Paulitsch und Barbu (2015).

#### **2.2.2 Holzwerkstoffindustrie mit Bezug auf leichte Holzwerkstoffe**

Nachdem sich, wie Kehr und Jensen (1975) berichten, die mittlere Rohdichte industriell hergestellter Spanplatten in den Jahren von 1955 bis 1972 konstant von 570 auf 720 kg m<sup>-3</sup> erhöht hat, forderten sie einen Wechsel hin zu geringeren mittleren Rohdichten bei Spanplatten und begründeten diese Forderung mit der unabdingbaren Rationalisierung des Rohstoffes Holz wegen des stetig wachsenden Bedarfs sowie der globalen Verknappung. Ebenso forderte Schulz schon 1970, dass sich die Forschungsbemühungen thematisch nun in Richtung Gewichtsreduzierung orientieren sollten (Clad 1982). Durch die Gewichtseinsparung ergeben sich in der Wertschöpfungskette von z.B. Möbeln, welche das Hauptabsatzgebiet der Spanplatte darstellen, logistische Vorteile wie Einsparung von Kraftstoff und Reduktion des Frachtaufkommens, aber auch Kunde und Hersteller profitieren beim Erwerb, Transport und Aufbau leichter Möbel, sowie durch ein einfacheres Handling (Marutzky und Sauerwein 2009). Im Allgemeinen wird der Rohdichtebereich unterhalb von 500 kg m<sup>-3</sup> für Plattenwerkstoffe als Leichtbau angesehen (Stosch 2004). Die Reduktion der Rohdichte der Spanplatte erfolgt meist über die Mittelschicht. In der Literatur werden hier unterschiedliche Ansätze beschrieben: Einsatz von natürlichen oder künstlichen Schaumstoffsystemen (Himmelheber et al. 1956; Deppe 1968; Monteiro et al. 2016; Shalhafan et al. 2016), Partikeln aus Lignocellulosen (Dix et al. 2009), Agrarprodukten wie Mais bzw. Popcorn (Burnett-Barking 2016), landwirtschaftlichen Restprodukten (Garay et al. 2009; Scatolino et al. 2013) oder leichten Holzarten wie Pappel (Roffael und Dix 1988), Kiri (Clad und Pommer 1980; Kalaycioglu et al. 2005) oder Kelempayan (Rahman et al. 2019). Beim Einsatz von schnellwachsenden Holzarten muss besonders darauf geachtet werden, dass Früh- und Spätholz zonen im Querschnitt des Holzwerkstoffes gleichmäßig verteilt sind, da es sonst zu Verformungen und Verwerfungen kommen kann (MacPeak et al. 1987).

Der Ressourcenmangel führte neben der Weiterentwicklung der Spanplatte auch zu neuen leichten Holzwerkstoffen, wie z.B. Sandwichplatten mit Wabenkernfüllung oder hohlem Kern, welcher mit Massivholzleisten gestützt wird. Die neuartigen Werkstoffe nehmen, wirtschaftlich gesehen, meist eine Randposition ein, da sie teuer und aufwendiger in der Produktion sind (Poppensieker und Thömen 2005). Wie Burnett-Barking (2016) erläutert, ist es aufgrund der fortlaufenden Verknappung von Holz absehbar, dass sich die Nachfrage, insbesondere von Nadelholz für die Auslastung der Span- und MDF-Plattenwerke nur mühsam bewerkstelligen lassen wird und die Holzwerkstoffindustrie sich der enormen Bedeutung, Alternativen zum Rohstoff Holz aufzutun, bewusst ist. Somit schätzt sie es als sehr wahrscheinlich ein, dass sich neue leichte Werkstoffe weiter auf dem Markt etablieren werden.

## 2.2.3 Bindemittel

### 2.2.3.1 Allgemein

Viele holzabhängige und bindemittelabhängige Faktoren bestimmen das Zusammenwirken der Holzoberfläche und des Bindemittels (Roffael 1999), wobei zu den holzabhängigen Faktoren die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Holzoberfläche und zu den bindemittelabhängigen Faktoren das Molverhältnis des aminoplastischen Harzes und dessen Viskosität im technisch relevanten Konsistenzbereich sowie verschiedene eingesetzte Modifizierungsmittel zählen (Dunky und Niemz 2002, S. 615). Die Festigkeit einer Verleimung setzt sich zusammen aus der Festigkeit der Leimfuge (Kohäsion), der Festigkeit der Grenzschicht zwischen Holzoberfläche und Leimschicht (Adhäsion) sowie der Festigkeit der zu verleimenden Teile (Habenicht 1997, S. 283). Während Adhäsion als das Aneinanderhaften von zwei verschiedenen Materialien, verursacht durch atomare oder molekulare Anziehungskräfte definiert ist, beschreibt Kohäsion die innere Festigkeit eines Werkstoffes, wobei es in der Klebtechnik ein auf die Klebschichtfestigkeit bezogener Begriff ist (Habenicht 2014, S. 171 und S. 180). Die Komplexität einer Verleimung von Holz beschreibt Marra (1992) in seiner „Equation of performance“, in welcher die bei einer Verleimung auftretenden Faktoren in einzelne Klassen eingeteilt wurden.

### 2.2.3.2 Harnstoff-Formaldehyd-Harze

Die Harnstoff-Formaldehyd-Harze (Englisch: *Urea-Formaldehyde*), auch UF-Harze genannt, stellen die wichtigste Gruppe der aminoplastischen Bindemittel dar, welche in der Holzwerkstoffindustrie verwendet werden (Dunky und Niemz, S. 251). Sie basieren auf den vielfältigen Reaktionen zwischen Harnstoff und Formaldehyd (Paulitsch und Barbu 2015, S. 86-88). Die Herstellung erfolgt in einem Dreistufenprozess (Horn et al. 1978): Methylolierung, Kondensation und Nachkondensation. Bei der Verarbeitung erfolgt die duroplastische Aushärtung, welche ein Merkmal ist, welches alle Formaldehyd-Kondensationsharze verbindet. Hierbei gehen die linearen oder verzweigten oligomeren bzw. polymeren Moleküle, welche in wässriger Lösung vorliegen, in unlösliche und unschmelzbare dreidimensionale Netzwerke über. Den vielen Vorteilen (farblose ausgehärtete Leimfuge, variable Einsetzbarkeit bei verschiedenen Hölzern, schnelle und vollständige Aushärtung, etc.) stehen einige entscheidende Nachteile wie die Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und Wasser, das Problem der Abspaltung von Formaldehyd während des Verarbeitungsprozesses und die nachträglich Formaldehydabgabe gegenüber (Dunky und Niemz 2002, S. 251-252). Während in den 1970er Jahren noch F/U-Molverhältnisse von 1,6 bis 1,8 üblich waren, sind diese seit Anfang des 21. Jahrhunderts auf 1,02 bis 1,08 reduziert worden (Dunky und Pizzi 2003). Die nachträgliche Formaldehydabgabe einer UF-beleimten Spanplatte setzt sich aus unterschiedlichen Faktoren zusammen: ca. 50 % kommt aus dem Bindemittel, ca. 20 % aus thermischer Behandlung (Trocknung und Pressen), ca. 15 % aus Waldholz und ca. 15 % aus Altholz (Kompetenzzentrum Holz Wood K+ in Linz nach Paulitsch und Barbu 2015, S. 427). Im Jahr 2014 hat die EU Formaldehyd als „kann Krebs erzeugen“ (Kategorie 1 B gemäß CLP Verordnung) eingestuft (UBA 2015). Trotz einer bereits deutlich gesunkenen nachträglichen Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen, bleibt die Problematik von Formaldehyd in der Innenluft aktuell. So ist am 01. Januar 2020 durch eine Kooperation des UBA (Umweltbundesamt) und der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) ein neues Prüfverfahren zur Formaldehydbestimmung unter realitätsnahen Bedingungen in Kraft getreten (UBA 2020).

### 2.2.3.3 Weitere Bindemittel

Neben Harnstoff-Formaldehyd-Harzen gibt es noch zahlreiche weitere Bindemittel. Dazu zählen Melamin-Formaldehyd (MF) und Mischharze (MUF, PMUF), Phenol-Formaldehyd (PF), darunter Alkalische PF und modifizierte PF, Resorcinolharze (RF, PRF), Isocyanate (PMDI), Polyurethane (PUR) und Polyvinylacetate (PVAc). Die unterschiedlichen Eigenschaften der Harze bestimmen deren Anwendungsgebiete (Tabelle 2-2) (Paulitsch und Barbu 2015, S. 84-95).

Tabelle 2-2: Kriterien für die Auswahl von Klebstoffen (Paulitsch und Barbu 2015, S. 85)

Eigenschaft	UF	M(U)F	PF	Resorcin	PMDI	Epoxi	Thermoplaste
<i>Feuchtigkeitsbeständigkeit</i>	gering	mittel	gut	sehr gut	gut	gut	gering
<i>Temperaturbeständigkeit</i>	gering	gut	gut	gut	gut	gut	gering
<i>Kriechen unter Last</i>	gering	gering	gering	gering	gering	gering	stark
<i>Fugenfüllend ohne Füllstoffe</i>	gering	gering	gering	gering	nein	gut	gering

### 2.2.3.4 Härter

Die Härtungsreaktion von UF-Harzen bei der Spanplattenproduktion läuft im sauren Bereich ab. Sie geschieht entweder durch die Reaktion des freien Formaldehyds im UF-Harz mit Härtern (vor allem Ammoniumsalzen) oder wird durch die direkte Zugabe von Säuren gestartet. Im ersten Fall reagieren die Ammoniumionen unter Wärme mit dem Formaldehyd, wodurch die Bildung von Säure die Härtungsreaktion initiiert. Der übliche Härteranteil in einer Spanplatten-Mittelschicht beläuft sich auf 1,5 bis 3 % Härterfeststoff / Festharz. Die Geschwindigkeit der Aushärtereaktion steigt stark aufgrund einer höher einwirkenden Temperatur (Dunky und Niemz 2002, S. 265-269). Die eigentliche Beschleunigung geschieht durch den Abfall des pH-Wertes, da durch den Temperaturanstieg der Gehalt an freiem Formaldehyd im Leim größer ist und die Umsetzung des Härters mit dem freien Formaldehyd schneller geschieht (Higuchi und Sakata 1979).

## 2.2.4 Spanplattenherstellung im Labormaßstab

### Rohstoffvorbereitung und Zerspannung

Die Baum- und Aststücke werden zuerst entrindet. Aufgrund der Größe des Zufuhrschlitzes des Hackers werden daraufhin alle Stücke mit einem Durchmesser >10 cm längs aufgetrennt oder gespalten, damit eine maximale Dicke von <10 cm gegeben ist. Daraufhin werden die Stücke auf eine Länge von etwa 1 m abgelängt. Die vorbereiteten Stücke können so dem Hacker zugeführt werden, welcher daraus Hackschnitzel herstellt. Diese Hackschnitzel werden direkt im Anschluss dem Messerringzerspanner zugeführt, wodurch das Spanmaterial entsteht.

### Sieben

Das Spanmaterial, welches aus dem Zerspannungsprozess hervorgeht, setzt sich aus Spänen unterschiedlicher Dimensionen zusammen. Für die Herstellung von Spanplatten mit Deck- und Mittelschicht ist eine Fraktionierung in feinere und gröbere Späne notwendig. Hierbei wird das

Spanmaterial auf Siebböden eines Taumelsiebs gegeben, welche unterschiedliche fest definierte Maschenweiten besitzen. Für die Mittelschicht wurden Siebböden mit Maschenweiten von  $1,3 \times 1,3 \text{ mm}^2$  und  $4,0 \times 4,0 \text{ mm}^2$  gewählt und für die Deckschicht  $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$  bis  $1,3 \times 1,3 \text{ mm}^2$ . Während des Rüttelvorgangs bleibt das gröbere Material auf den oberen Siebböden und das feinere Material fällt weiter nach unten durch und das fraktionierte Siebmaterial wird automatisch zur Lagerung in Auffangbehälter überführt. Der feine Holzstaub fällt nach unten durch und wird direkt verworfen.

### Trocknung

Das zu verarbeitende Material ist i.d.R. noch feucht, da sonst bei der Zerspaltung des Holzes eine immense Menge an Holzstaub entsteht. Die Späne müssen vor der Beleimung auf  $<5 \%$  Holzfeuchte getrocknet werden, um Dampfspalter nach dem Heißpressvorgang zu vermeiden. Dampfspalter entstehen, wenn im Zuge des Heißpressvorgangs die Feuchtigkeit nicht schnell genug nach Außen transportiert werden kann. Der Trocknungsvorgang der Späne wird im Holz Trockner (Spezialanfertigung der HB Group, Almelo, Niederlande) der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte des Burckhardt-Instituts mit einem speziellen Gestell für Spänetrocknung durchgeführt. Die Späne werden für 72 Stunden bei  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet, wobei sie zur weitestgehend einheitlichen Trocknung alle 24 Stunden durchmischt und gewendet werden.

### Beleimung

In der Spanplattenproduktion ist neben der Wahl des Holzes auch die Wahl des Bindemittels von entscheidendem Einfluss. Für die Herstellung von Spanplatten für die Forschungsstudien, welche Teil dieser Arbeit sind, wird ausschließlich Harnstoff-Formaldehyd-Harz verwendet. Für die Beleimung kommt eine kleinvolumige Leimtrommel zum Einsatz. Während des Beleimungsvorgangs wird das Bindemittel über eine in der Leimtrommel verbaute Düse auf die Späne gesprüht. Durch die ständige Bewegung verteilt sich das Bindemittel untereinander gleichmäßig über das ganze Material. Deck- und Mittelschichten weisen aufgrund des unterschiedlichen Materials auch unterschiedliche Bindemittelmengen auf.

### Streuung und Formgebung

Die Streuung wird im händischen Verfahren durchgeführt. Bei dreischichtigen Spanplatten wird immer ein mengenmäßiges Verhältnis von  $60 \%$  Mittelschicht zu  $40 \%$  Deckschichten eingehalten. Hierfür werden die abgewogenen Deck- und Mittelschichtspäne mit einer Handschaufel in eine quadratische Form mit den Dimension  $45 \times 45 \text{ cm}^2$  gegeben, wobei die Späne über den gesamten Streubereich verteilt werden. Im nächsten Schritt erfolgt die Vorverdichtung bei ca. 6 bar. Durch die Kaltklebrigkeit des Bindemittels behält der vorverdichtete Spankuchen seine Form bei der Überführung von Vorpresse in Heißpresse.

### Pressen

Bei einem Druck von  $6,81 \text{ N mm}^{-2}$  und einer Temperatur von  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  wird der vorverdichtete Spankuchen für  $12 \text{ s mm}^{-1}$  in einer Heißpresse gepresst, wobei über und unter dem Spankuchen eine mit Wachsfolie beschichtete Metallplatte angebracht wird, um ein einwandfreies Entfernen der frisch gepressten Spanplatte zu gewährleisten. Zur Einhaltung der Zieldicke werden quadratische Metallstangen mit definierten Maßen benutzt. Nach Ablauf der Presszeit wird dann die Spanplatte samt

den mit Wachsfolie beschichteten Metallplatten herausgeholt, beschriftet und in eine Abkühleinrichtung gestellt.

### Endfertigung

Die Endfertigung besteht aus den folgenden Schritten: Reifelagerung, Besäumen, Schleifen und Zuschneiden der Prüfkörper und Konditionierung dieser in der Klimakammer bei 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit. Die Reifelagerung erfolgt in einer Abkühleinrichtung, in welcher von allen Seiten Luft an die frisch gepresste Platte gelangen kann. Sie muss durchgeführt werden, damit es nach dem Pressvorgang im Zuge der Lagerung nicht zu einer Hydrolyse des Bindemittels kommt. Wenn dies geschieht, verliert das Bindemittel einen Teil seiner Festigkeit und die Festigkeitseigenschaften der Platte sinken erheblich. Zudem sind die Deckschichten unmittelbar nach dem Pressvorgang trockener als die Mittelschicht. Im Zuge der Abkühlung in der Abkühleinrichtung nehmen die Deckschichten wieder Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Formstabil bleiben die Platten nur, wenn nach dem Abkühlen zwischen Deck- und Mittelschicht keine Feuchtigkeitsunterschiede mehr bestehen, sonst führen die dadurch entstehenden Spannungen zu einer irreversiblen Verformung der Platte. Nach dem Abkühlen werden die Spanplatten an einer Kreissäge besäumt. Zur Entfernung der „Presshaut“, welche im Zuge des Heißpressvorgangs auf der Oberfläche der Spanplatte entsteht, und um exakte Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität zu gewährleisten, werden von der Ober- und Unterseite der Spanplatte 0,5 mm im Schleifautomaten abgeschliffen. Danach erfolgen der Zuschnitt der Prüfkörper und eine ca. zweiwöchige Lagerung in der Klimakammer. Die Lagerung erfolgt solange, bis an zwei aufeinanderfolgenden Messungen im Abstand von 24 Stunden der Gewichtsunterschied nicht mehr als 0,1 % ausmacht.





## 3 VERÖFFENTLICHUNGEN

### 3.1 Publikation 1

#### Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards?

Autoren: Philipp A. Nelis, Franz Michaelis, Kim C. Krause & Carsten Mai  
 Journal: European Journal of Wood and Wood Products 76:445–453  
 Jahr: 2018  
 DOI: 10.1007/s00107-017-1222-7

#### Autorenschaft nach Clement (2014)

Autoren	Ideen (30 %)	Arbeit (30 %)	Schreiben (30 %)	Verwaltung (10 %)	Beitrag / Verantwortung
P. A. Nelis	10 %	30 %	70 %	10 %	34 %
F. Michaelis	20 %	55 %	0 %	10 %	23,5 %
K. C. Krause	10 %	15 %	10 %	10 %	11,5 %
C. Mai	60 %	0 %	20 %	70 %	31 %

**Ideen:** Konzeption der Untersuchung / Versuchsplanung / Interpretation der Daten

**Arbeit:** Durchführung des Versuchs / Datenaufnahme und -analyse

**Schreiben:** Entwurf des Artikels / kritische, inhaltliche Überarbeitung / Begutachtung der Endfassung

**Verwaltung:** Erschließung von Ressourcen und Gewährleistung der wissenschaftlichen Integrität vor, während und nach der Publikation



ORIGINAL

## Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards?

Philipp A. Nelis<sup>1</sup> · Franz Michaelis<sup>1</sup> · Kim C. Krause<sup>1</sup> · Carsten Mai<sup>1</sup>Received: 13 July 2016 / Published online: 21 July 2017  
© Springer-Verlag GmbH Germany 2017

**Abstract** Kiri trees are fast-growing species, which are increasingly cultivated on plantations in Europe. This study assesses the application of kiri wood (*Paulownia tomentosa*) for the production of particleboards. Single-layer particleboards (PBs) were produced from kiri particles (KPs), industrial particles (IPs) and various mixtures of both materials with target densities of 350, 500 and 650 kg m<sup>-3</sup>, respectively. The composition of the PBs was 100% KPs, 66% KPs, 33% KPs and 0% KPs (100% IPs). PBs based on 100% IPs exhibited the lowest mechanical strength properties, which increased with increasing proportions of KPs within the same density range. The swelling properties of the boards were similar within one density range. The formaldehyde contents of PBs made of KPs were higher compared to PBs based on IPs, but all values were below the threshold value given in EN 13986 (Wood-based panels for use in construction—characteristics, evaluation of conformity and marking, German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2004). X-ray micro-computed tomography (X $\mu$ CT) revealed differences in the structure and compression of the PBs based on KPs and IPs resulting in smaller and more evenly distributed voids between the particles in PBs based on KPs. This study shows that kiri wood is a promising raw material for the PB industry, both alone and in mixtures with other particles.

### 1 Introduction

The availability of wood assortments to be used in the European wood-based panel industry will very probably remain limited in the coming years (Knauf and Frühwald 2015). The determining factor for the conceivable shortage is the increasing energetic use of wood due to strong state support such as reduced sales tax, the market incentive programme and the funding of installations as a result of the German Renewable Energy Sources Act (EEG) (Association of German Wood-based Materials Industry (VHI) 2010). This competition between material and thermal utilization has caused a price increase for wood assortments for particleboard (PB) production (Michanickl 2007). A further challenge for the future raw material supply in the wood-based panel industry is the forest conversion. Over a long period of time, the forest sector has focused on increasing the proportion of softwood in German forests, but nowadays an attempt is being made to increase the hardwood share due to ecological reasons (Welling 2012). Thus, the assessment of potentially suitable raw materials for the PB industry will become more important in the future (Wimmer et al. 2009). Several studies report on partial substitution of wood as raw material in particleboards (PBs) with alternative raw materials such as maize or agricultural residues (Scatolino et al. 2013; Garay et al. 2009); other studies address the full substitution of wood in PBs (Balducci et al. 2008; Çöptür et al. 2007). The use of fast growing trees, such as poplar, to enhance the raw material supply was also discussed (Buchholzer 1992).

A mostly unknown tree species, which has not been used for the production of particleboards in Europe, is *Paulownia tomentosa*, the kiri tree. *Paulownia tomentosa*, also known as Empress-tree or Princess-tree (Flynn and Holder 2001), belongs to the Paulowniaceae family,

✉ Carsten Mai  
cmai@gwdg.de

<sup>1</sup> Wood Biology and Wood Products, Burekhardt Institute, University of Göttingen, Büsingenweg 4, 37077 Göttingen, Germany

comprising a single genus and six species (Olmstead et al. 2009). *Paulownia* is native to Eastern Asia (Hu 1961) and has been cultivated in China for 2000 years (Barton et al. 2007). It was introduced to Europe (France) in 1834 (Rein 1889).

*Paulownia* is an exceptionally fast growing tree genus (Hu 1961; Rao 1986; Flynn and Holder 2001). Under optimal conditions, full-grown *Paulownia* can reach heights up to 25 m and diameters between 60 and 120 cm (Flynn and Holder 2001). Valuable timber can be harvested after only 5 years under good management (Rao 1986). The wood has an average reported density of  $0.35 \text{ g cm}^{-3}$ , is soft, ring-porous, straight-grained and has a satiny luster (Flynn and Holder 2001). *Paulownia* wood displays a high strength-to-weight ratio, but is hardly suitable under load-bearing conditions (Akyildiz and Kol 2010). Due to the rapid growth, *Paulownia* species have been cultivated to produce high-quality timber on plantations recently in many European countries. According to the European regulations EC N.73 (2009) and EC N.1120 (2009), short-rotation plantations on agricultural area are no longer classified as forests, if the rotation periods are less than 20 years. Thus, an afforestation approval is not needed for such kiri tree coppices, as the plantations are considered as agricultural areas. Due to these new legal conditions, it has become easier to start cultivating *Paulownia* plantations in Germany; nevertheless the challenge of finding suitable land exists because the availability of cultivable land is decreasing and the mean price per acre has been constantly rising since 10 years (German Federal Statistical Office 2016). Short rotation material including branches and saw mill by-products could become available as a possible raw material for the German wood-based panel industry in a few years.

A fast growing species like *Paulownia* spp. could contribute to enhancing the raw material supply and as well protect the domestic forests by using wood from plantations. The objective of this research was to study the usability of kiri wood as raw material for particleboard production. Single-layer particleboards with various densities based on kiri particles (KPs) were produced and their mechanical and physical properties were compared with PBs based on industrial particles (IPs). The production of particleboards based on kiri wood has previously been studied (Clad and Pommer 1980; Kalaycioglu et al. 2005), but this study also focuses on the use of particle mixtures and on the production of especially light PBs with comparable properties to standard PBs to reduce the consumption of raw materials. The focus on these mixtures is of special importance, because the availability of kiri wood will not be sufficient to cover the demand of the German PB industry in the upcoming years.

## 2 Experimental

### 2.1 Wood particles

Log pieces and branches with diameters of 5–40 cm of a kiri tree (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.) grown in the greater Mannheim (Germany) area were provided by WeGrow GmbH (Bonn, Germany). They were debarked manually and chopped into kiri chips with a chopper (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). The kiri chips were further chipped to particles with a knife ring flaker (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). The classification of the kiri particles (KPs) was carried out with a tumbler screener (Allgaier, Uhingen, Germany). Four fractions were separated: particles  $>4$ ,  $>3$ ,  $>1.5$  and  $>0.4$  mm. Then, the KPs were dried to  $<5\%$  moisture content in a timber dryer (HB Drying Systems, Almelo, Netherlands). Core-layer wood particles were obtained from Glunz AG (Nettgau, Germany) and are referred to as industrial particles (IPs). They consisted of 35% recycled wood, 15% industrial wood residues and 50% fresh wood (75% softwood, 25% hardwood). The proportional particle size distribution of the IPs was defined via sieve analysis using the sieving device KS1000 (Retsch, Haan, Germany). This distribution was used as basis for the compilation of the four fractions of KPs in order to obtain the same particle size distribution in all PBs produced.

### 2.2 Panel manufacturing

Eight variants of single-layered PBs with three target densities ( $350$ ,  $500$ ,  $650 \text{ kg m}^{-3}$ ) were produced. For each density, PBs with 100% KPs and 100% IPs were manufactured. Additional PBs with a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$  were produced from mixtures of 66% KPs and 33% IPs as well as of 33% KPs and 66% IPs. The particles were resinated in a rotating drum blender with 10% ( $\text{wt}_{\text{dry resin}}/\text{wt}_{\text{dry particles}}$ ) Kauramin K350 UF resin (BASF AG, Ludwigshafen, Germany) with a solid content of 66.9%. A solution of ammonium sulphate (33%) was added to the resin with a load of 2% ( $\text{wt}_{\text{dry solution}}/\text{wt}_{\text{dry resin}}$ ) as a hardener. The resinated particles were formed into a mat ( $450 \times 450 \text{ mm}^2$ ) and were cold pre-pressed before the mat was hot-pressed at  $200^\circ\text{C}$  and 200 bar for  $12 \text{ s mm}^{-1}$  using stops to ensure a target thickness of 16 mm. Four PBs were produced for each of the eight variants. The pressing time of PBs from 100% KPs with a target density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  was increased to  $25 \text{ s mm}^{-1}$  to avoid blisters. After the hot-pressing process, the PBs were cooled to room temperature, sanded to a thickness of 15 mm and cut to dimensions of  $390 \times 390 \text{ mm}^2$ . Then, the PBs were cut into various specimens according to a cutting plan following EN 326-1 (1994).

### 2.3 Physico-mechanical properties

All specimens were conditioned to constant mass at 20 °C and 65% RH. Bulk density was determined according to EN 323 (1993), bending strength (modulus of rupture, MOR) and modulus of elasticity in bending (MOE) according to EN 310 (1993) (4 specimens per board,  $n=16$ ), and internal bond strength according to EN 319 (1993) (five specimens per board,  $n=20$ ). Thickness swelling was assessed after 24 and 72 h immersion in water at 20 °C according to EN 317 (1993) (five specimens per board,  $n=20$ ). In addition, the relative and absolute water absorption (WA) were determined after 24 h and 72 h immersion in water. The formaldehyde content of the PBs was assessed by the perforator method according to EN 120 (1992) ( $n=2$ ).

### 2.4 X-ray micro-computed tomography (X $\mu$ CT)

X-ray micro-CT images were recorded by means of the sub-micro-focus X-ray tube *nanotom<sup>®</sup>s* (GE Sensing and Inspection Technologies, Wunstorf, Germany) with a cone beam geometry, a transmission molybdenum target and a CCD detector. All investigated specimens were cut from parent PBs with a band saw. The parameter settings (200  $\mu$ A current, 4/1 average, 1 $\times$ 1 binning, 750 ms exposure time, 2000 projections and 129 min scanning time) were the same for all specimens. The respective specimen dimensions, densities, particle composition and changing parameter settings for the X $\mu$ CT measurement are presented in Table 1. Single and double specimens (consisting of a single KP and a single IP specimen) were investigated. All specimens were vertically glued onto cylindrical glass rods (5 mm diameter) using a hot-melt adhesive glue stick (Emil Lux GmbH & Co. KG, Wermelskirchen, Germany). Additionally, the double specimens consisting of a single KP and a single IP specimen with the same densities were glued together using the same hot-melt adhesive. Prior to the X $\mu$ CT measurement, the specimens were conditioned to constant mass at 20 °C and 65% RH.

The data processing and reconstruction was conducted using Avizo<sup>®</sup> 9 (FEI Visualization Sciences Group,

Hillsboro, USA). After reconstruction, the datasets were filtered by the Non-Local Means Filter algorithm to reduce the regular background noise. Image segmentation was done by interactive thresholding and the respective grayscale coefficient values of the wood tissue or voids (air), respectively. After segmentation, both phases, either wood or voids, were binarized. Then, subvolumes with sizes of 797 mm<sup>3</sup> (350 kg m<sup>-3</sup>), 554 mm<sup>3</sup> (500 kg m<sup>-3</sup>) and 657 mm<sup>3</sup> (650 kg m<sup>-3</sup>) were selected for double specimens. For the single specimens, a subvolume of 10,292 mm<sup>3</sup> was selected. From these subvolumes the porosity was determined as the ratio between the volume of voids and the total volume of voids and wood tissue. The visualization was performed using volume rendering.

### 2.5 Statistical analysis

Physico-mechanical properties of the PB variants with the same target density were tested for significant differences between the means. Sample means of PBs based on 100% KPs were compared to PBs based on 100% IPs at 500 and 650 kg m<sup>-3</sup> density. The normal distribution was assessed with the Shapiro–Wilk test, the variance homogeneity with the F-test. In case of normal distribution, a two-sample-*t*-test was performed; otherwise a Wilcoxon Rank-Sum test was used. In case of inhomogeneous variances, Welch’s *t*-test was performed.

For the PBs with a density of 350 kg m<sup>-3</sup>, significant differences between means were determined using a One-Way-ANOVA in case of normal distribution and homogeneity of variances. Otherwise a Kruskal–Wallis-test was used. In case of significant differences between the sample means, Tukey’s test followed the One-Way-ANOVA as well as a pairwise Wilcoxon-test followed the Kruskal–Wallis-test. The normal distribution was tested using the Shapiro–Wilk test, the variance homogeneity was tested with Levene’s test.

**Table 1** Specimen information and parameter settings of the X $\mu$ CT measurements

	Specimen characteristics				
	Single KP	Single IP	Double	Double	Double
Density of PB [kg m <sup>-3</sup> ]	350	350	350	500	650
Composition	100% KPs	100% IPs	100% KPs 100% IPs	100% KPs 100% IPs	100% KPs 100% IPs
Specimen dimensions [mm <sup>3</sup> ]	50 $\times$ 50 $\times$ 10	50 $\times$ 50 $\times$ 10	10 $\times$ 20 $\times$ 15	10 $\times$ 20 $\times$ 15	10 $\times$ 20 $\times$ 15
Resolution [ $\mu$ m]	25	25	12	12	11.25
Source-to-detector distance [mm]	420	420	400	400	400
Source-to-specimen distance [mm]	210	210	96	96	90

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Production of particleboards

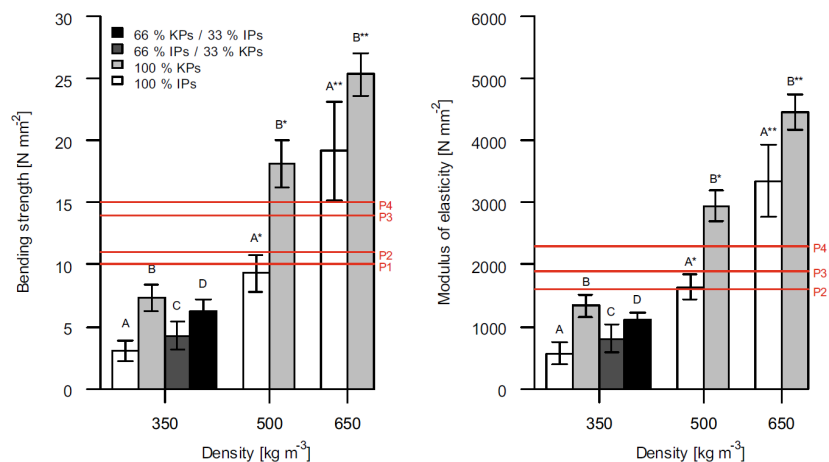
All PB variants could be produced without technical problems, except for those based on 100% KPs with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$ . Here, blisters occurred after opening the press. Generally, blisters can occur, when the internal gas pressure in the mattress at the end of the pressing time exceeds the internal bond strength in the hot state above  $100^\circ\text{C}$  in the core (Irle and Barbu 2010). There are multiple reasons that can cause blisters, i.e. high moisture content of the resinated particles, varying moisture content of the dried particles (drying problem) or a too fast reduction of the pressing force (Dunky and Niemz 2002). The low bulk density of the kiri particles results in a voluminous mattress for PBs based on 100% KPs and thus, in a low permeability of the mattress for water vapour, which enhances the probability of blisters (Kamke 2004). To avoid these blisters, for PBs based on 100% KPs with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  no additional water was added to the adhesive and the pressing time was changed from 12 to  $25 \text{ s mm}^{-1}$ . Due to the adjustment of the production conditions, the PBs of 100% KPs with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  could not be directly compared with the other variant of the same density. Dunky and Niemz (2002) reported that the strength of a PB produced with low-formaldehyde UF resin [E1 according to EN 717-1 (2004)] is not increased by an extended pressing time due to limited opportunities of cross-linking. Still, it cannot be clearly said whether the prolonged pressing time had a positive effect on the PB properties.

#### 3.2 Modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)

As expected, both MOR and MOE increased with an increasing density of the PB variants (Fig. 1). PBs made of 100% KPs and PBs with an increasing proportion of KPs displayed significantly higher values than those based on 100% IPs. Although only one-layered panels were tested, the PBs based on 100% KPs with densities of 500 and  $650 \text{ kg m}^{-3}$  met the MOE and MOR requirements for the board types P1–P4 according to EN 312 (2010). In addition, PBs based on 100% IPs with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  met the requirements for these board types. PBs based on 100% IPs with a density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  met only the MOE requirements for board type P2.

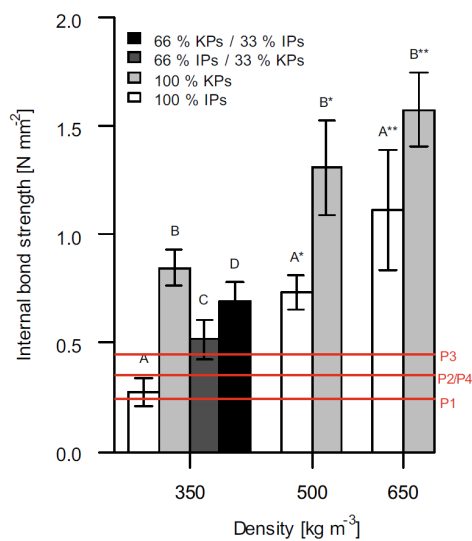
It was previously shown that the lower the bulk density of the used wood particles, the higher the MOR (Kehr and Schilling 1962; Kehr 1965). To obtain PBs with the same target density, particles with a low bulk density must be compressed more than those with a high density. This higher compression ratio leads to improved mechanical properties (Stegmann et al. 1965). For low-density wood species the total surface area of a given amount of particles is considerably higher in comparison to high-density wood species, which leads to a better utilization of the resin, when evenly distributed (Dunky and Niemz 2002). The values for MOR and MOE lie between those previously found. Clad and Pommer (1980) detected partly higher values for MOR for single-layer PBs based on KPs with a density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$ . Kalaycioglu et al. (2005), however, reported generally lower values for MOR and MOE for three-layer PBs based on KPs with densities of 550 and  $650 \text{ kg m}^{-3}$ .

**Fig. 1** Bending strengths (left side) and MOE (right side) of 8 variants of particleboards ( $n = 16$ , mean  $\pm$  SD). Horizontal lines indicate the minimum requirements for board types P1–P4 according to EN 312 (2010). Different letters mark significant differences between particleboard variants of one density



### 3.3 Internal bond strength (IB)

Like MOR and MOE, IB showed a positive correlation with the density of the PBs (Fig. 2). In addition, PBs with an increasing proportion of KPs exhibited significantly higher IB than those based on 100% IPs. PBs based on 100% KPs showed even higher IB values than those with higher densities made of 100% IPs. A proportion of only 33% KPs almost reduplicated the IB of PBs with a density



**Fig. 2** Internal bonding strengths of eight variants of particleboards (n=12, mean±SD). Horizontal lines indicate the minimum requirements for board types P1–P4 according to EN 312 (2010). Different letters mark significant differences between particleboard variants of one density

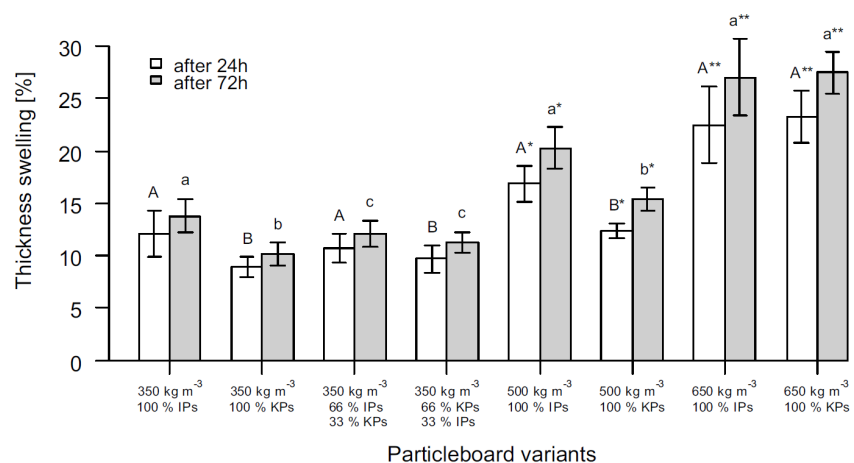
of 350 kg m<sup>-3</sup> compared to PBs based on 100% IPs. All PBs based on KPs met the requirements for the board types P1–P4 according to EN 312 (2010). The determined results for PBs based on 100% KPs with densities of 500 and 650 kg m<sup>-3</sup> were almost twice as high as found by Kalaycioglu et al. (2005) for three-layer PBs. The high IB of the PBs based on KPs was again attributed to the high compression ratio of these PBs.

### 3.4 Thickness swelling (TS), relative and absolute water absorption (WA)

TS after 24 and 72 h immersion in water increased with an increasing density of the PB variants (Fig. 3). PBs based on 100% KPs showed lower TS after 24 and 72 h than PBs based on 100% IPs, except for PB variants with a density of 650 kg m<sup>-3</sup>; the latter did not show significant differences. TS also decreased in PBs with a density of 350 kg m<sup>-3</sup> with increasing proportion of KPs.

All PB variants with 350 kg m<sup>-3</sup> density and those based on 100% KPs with a density of 500 kg m<sup>-3</sup> met the requirements for 24 h TS for the board types P3 and P4 according to EN 312 (2010). TS of PBs is ascribed to hydrolysis of the adhesive, wood swelling, which has only a minor effect, and the residual stress as a result of the softening of the PB structure (Stegmann and Kratz 1967). The extent of this so-called springback is undoubtedly influenced by the bulk density of the particles, in particular the degree of compression (Hann et al. 1963). TS is reported to increase with increasing board density. A high degree of compression was observed in PBs based on KPs due to the low density of the kiri wood and the low bulk density of the particles (high required volume). Thus, a higher TS of the PBs based on KPs was expected, but probably the high IB of these PBs counteracted TS. The TS values for PBs based

**Fig. 3** Percentage thickness swelling of eight variants of particleboards after 24 and 72 h immersion in water (n=20, mean±SD). Different letters mark significant differences between particleboard variants of one density



on 100% KPs with a density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  corresponded with those of Clad and Pommer (1980) and Kalaycioglu et al. (2005).

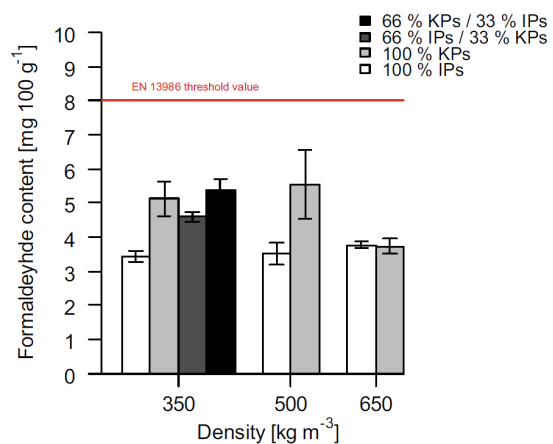
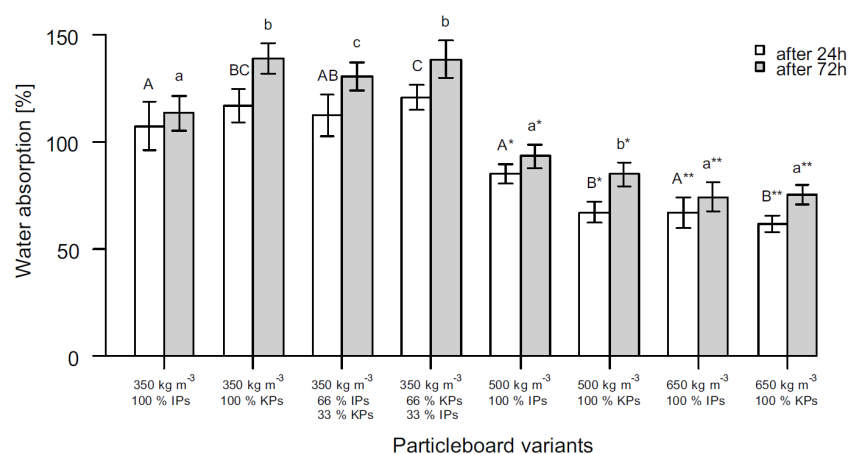
The relative WA (based on the mass of the PBs) after 24 and 72 h immersion revealed a negative correlation with the densities of the PBs (Fig. 4). This observation is in line with results of Roffael and Rauch (1972). The absolute WA (based on the volume of the PBs) showed very similar values for all PB variants (not shown). The crucial factors for the WA are the cavity volumes of the PBs before immersion and the TS (springback) during immersion. TS generates and enlarges cavities and entails more water uptake. The low WA after 72 h of PBs based on 100% IPs and a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$  was not expected, because these PBs exhibited the highest thickness swelling in comparison with other variants with a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$ . In addition, PBs based on 100% IPs have comparatively more cavities (see below), since IPs are less compressed than KPs because of their higher density.

The significantly higher WA of PBs based on 100% IPs with a density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  in comparison with PBs based on 100% KPs could be explained by the greater TS. Furthermore, PBs based on 100% IPs exhibited a higher cavity volume in comparison with PBs based on 100% KPs due to their lower compression. The relative WA for PBs based on 100% KPs with a density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  was clearly lower than reported by Clad and Pommer (1980).

### 3.5 Formaldehyde content

The formaldehyde contents of all PB variants were below the threshold value of  $8 \text{ mg}$  per  $100 \text{ g}$  oven dry board according to EN 13986 (2004) (Fig. 5). The formaldehyde contents of PBs based on 100% KPs with a density of  $350$  and  $500 \text{ kg m}^{-3}$  were higher than the values of the corresponding PBs based on 100% IPs.

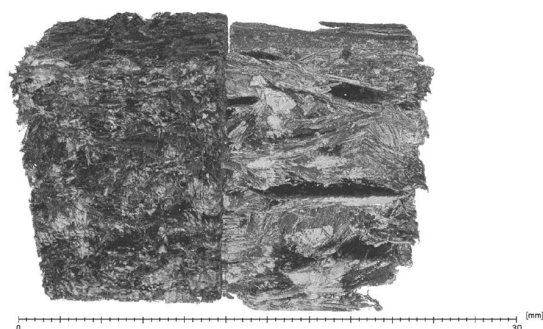
**Fig. 4** Percentage water absorption (WA) of eight variants of particleboards after 24 and 72 h immersion in water ( $n=20$ , mean  $\pm$  SD). Different letters mark significant differences between particleboard variants of one density



**Fig. 5** Formaldehyde contents of eight variants of particleboards ( $n=2$ , mean  $\pm$  SD). The horizontal line indicates the threshold value for class E1 according to EN 13986 (2004)

The values of PBs based on KPs showed a noteworthy variation, depending on density and proportion of KPs, whereas the formaldehyde contents of PBs based on 100% IPs varied only slightly. The values for PB variants with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  were similar. The amount of formaldehyde released during manufacturing and storage of PBs depends on various influencing factors: pressing time and pressing temperature, nature and quantity of the hardener, type of wood, humidity of the resinated particles, amount of resin, molar ratio (of urea and formaldehyde) and the content of free formaldehyde in the resin. In addition, resin distribution, particle shape as well as compression and dimensions of the PB are crucial factors for formaldehyde emission (Petersen et al. 1972, 1973, 1974). The low formaldehyde content





**Fig. 6** 3D rendered X-ray micro-CT image of a double specimen made of PBs with densities of  $350 \text{ kg m}^{-3}$ . PB specimen based on 100% KPs (left side). PB specimen based on 100% IPs (right side)

**Table 2** Porosity of single and double specimens of KP and IP with different densities

	Sample characteristics				
	Single KP	Single IP	Double	Double	Double
Density [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	350	350	350	500	650
KP porosity	0.24	–	0.35	0.22	0.19
IP porosity	–	0.35	0.36	0.29	0.26

of PBs based on 100% KPs with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$ , compared to the other PBs based on 100% KPs, could be caused by the increased pressing time, which led to a higher formaldehyde release during manufacturing (Dunky and Niemz 2002). The higher formaldehyde contents of the other PBs based on KPs compared to IPs might be caused by the effect of different compression ratios on the formaldehyde release during manufacturing and/or by the natural formaldehyde content of kiri wood itself. Few references are available with regard to the influence of the type of wood on the formaldehyde release during production of PBs (Petersen et al. 1973). Due to the fact that the perforator method can only specify the theoretically emitable formaldehyde, serious conclusions cannot be drawn regarding the time course of the emission. The subsequent formaldehyde emission of PBs can vary depending on the type of wood (Petersen et al. 1973; Roffael et al. 1994). The structure of a PB and especially the permeability of its surface influence the subsequent formaldehyde emission too (Dunky and Niemz 2002). Therefore, it could be expected that the subsequent formaldehyde emission of PBs based on KPs is less compared to PBs based on IPs or lasts for a longer time, because of the higher compression of these particles.

### 3.6 X-ray micro-computed tomography (X $\mu$ CT)

The visualization of slices through the double specimen of PBs with  $350 \text{ kg m}^{-3}$  showed that the intercellular voids in PBs based on 100% KPs were smaller and more evenly distributed than in PBs of 100% IPs (Fig. 6). In the former, more contact areas could be identified between the particles. The double specimens with 500 and  $650 \text{ kg m}^{-3}$  indicated comparable differences between PBs based on 100% KPs and 100% IPs (not shown). As mentioned above, the low bulk density of kiri wood caused a greater particle volume in PBs than IPs, which led to a higher degree of compression.

These structural differences might explain the enhanced mechanical and physical properties of the PBs made of KPs. The size and number of the contact areas and the voids between the particles determine the total adhesion forces and, thus, the strength and stiffness of the whole PB. Intensive compression also enhances the thermal and acoustic properties, but also the permeability of the PB (Walther 2010) and therefore also the water uptake and formaldehyde emission.

The analysis of selected sub-volumes of single and double specimens of parent PB material with target densities of 350, 500 and  $650 \text{ kg m}^{-3}$  shows that with an increasing target density the porosity decreases, which means the higher the density, the less voids are present (Table 2). Sackey and Smith (2010) also stated that the void volume increases with increasing coarse particles in the panel core. To preclude the appearance of different particle sizes in the panel core, the same particle size distribution was used for all PBs. The porosity of PBs made of KPs is consistently lower than that of PBs from IPs with the same density. This information shows again that for PBs with the same densities a lower particle density results in a higher compression ratio which leads to advanced physico-mechanical properties. The porosity for the double specimen with a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$  showed similar values for both KP and IP, which could be caused by an unequal particle distribution as a result of mattress forming by hand.

## 4 Conclusion

PBs from KPs with a density of 350 and  $500 \text{ kg m}^{-3}$  can be produced without technical problems, while pressing of those with a density of  $650 \text{ kg m}^{-3}$  caused blisters after opening the press. PBs based on KPs exhibit higher strengths than those based on conventional IPs, when the same density is compared. The results show that light-weight PBs based on KPs could replace PBs based on IPs with higher density and provide the basis for new innovative products, i.e. for light-weight construction. Production

of light-weight panels could circumvent the problems observed during the manufacture of PBs with high density from KPs. In addition, PBs with a lower proportion of KPs (33%) led to considerably improved strengths. Considering the currently low availability of *Paulownia* wood in Germany, the admixture of KPs could be a first approach to use *Paulownia* wood in the particleboard industry.

**Acknowledgements** The authors wish to acknowledge funding by AiF Projekt GmbH (Project No. KF2454610WZ4) as well as the provision of *Paulownia* wood by WeGrow GmbH.

## References

- Akyildiz MH, Kol HS (2010) Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *J Environ Biol* 31:351–355
- Association of German Wood-based Materials Industry (VHI) (2010) Fragen und Antworten zur Forderung der Kaskadennutzung von Holz (Questions and Answers regarding the claim of cascade use). Document published in the course of EPF-Aktionstag on October 29th, 2010 (**in German**)
- Balducci F, Harper C, Meinschmidt P et al (2008) Development of Innovative Particleboard Panels. *Drv Ind* 59:131–136
- Barton IL, Nicholas ID, Ecroyd CE (2007) Paulownia. *For Res Bull No.* 231:71
- Buchholzer P (1992) Eignung von Pappelindustrieholz unterschiedlicher Klone, Altersstufen und Standorte für die Spanplattenherstellung. (Suitability of industrial poplar wood of different clones, ages and sites for particleboard production). *Holz-Zentralblatt* 118:165–168 (**in German**)
- Clad W, Pommer E-H (1980) Particleboard from Kiri (*Paulownia tomentosa*, Fam. Scrophulariaceae). *Holz Roh-Werkst* 38:385–391
- Çöpür Y, Güler C, Akgül M, Taşcıoğlu C (2007) Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production. *Build Environ* 42:2568–2572
- Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime, Technologie und Einflussfaktoren (Wood-based panels and glues, technologies and influencing factors). Springer (**in German**)
- EC N.1120 (2009) COMMISSION REGULATION (EC) No 1120/2009 of 29 October 2009 laying down detailed rules for the implementation of the single payment scheme provided for in Title III of Council Regulation (EC) No 73/2009 establishing common rules for direct support schemes for farmers under the common agricultural policy and establishing certain support schemes for farmers. Commission of the European Communities
- EC N.73 (2009) COUNCIL REGULATION (EC) No 73/2009 of 19 January 2009 establishing common rules for direct support schemes for farmers under the common agricultural policy and establishing certain support schemes for farmers, amending Regulations (EC) No. 1290/2005, (EC) No. 247/2006, (EC) No 378/2007 and repealing Regulation (EC) No. 1782/2003. Rat der Europäischen Union
- EN 120 (1992) Wood-based panels; determination of formaldehyde content; extraction method called perforator method; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 13986 (2004) Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 310 (1993) Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 312 (2010) Particleboards—Specifications; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 317 (1993) Particleboards and fibreboards; determination of swelling in thickness after immersion in water; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 319 (1993) Particleboards and fibreboards; determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 323 (1993) Wood-based panels; determination of density; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 326-1 (1994) Wood-based panels—sampling, cutting and inspection—Part 1: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- EN 717-1 (2004) Wood-based panels—determination of formaldehyde release—Part 1: Formaldehyde emission by the chamber method; German version. European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium
- Flynn JH, Holder CD (2001) A guide to useful woods of the world, 2nd edn. Forest Products Society, Madison, WI
- Garay RM, MacDonald F, Acevedo ML, Calderón B, Araya JE (2009) Particleboard made with crop residues mixed with wood from *Pinus radiata*. *BioResources* 4:1396–1408
- German Federal Statistical Office (2016) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei-Kaufwerte für landwirtschaftliche Grundstücke (Agriculture and forestry, fisheries-purchase value of agricultural properties); Fachserie 3 Reihe 2.4
- Hann RA, Black JM, Blomquist RF (1963) How durable is particleboard? Part II. The effect of temperature and humidity. *Prod J* 13:169:174
- Hu S-Y (1961) The economic botany of the paulownias. *Econ Bot* 15:11–27
- Irle M, Barbu MC (2010) Wood-Based Panel Technology. In: Wood-based panels—an introduction for specialists. Brunel University Press, London
- Kalaycıoğlu H, Deniz I, Hiziroğlu S (2005) Some of the properties of particleboard made from paulownia. *J Wood Sci* 51:410–414
- Kamke FA (2004) Physics of hot-pressing. In: Fundamentals of composite processing. Proceedings of a workshop. Tech. Rep. FPL-GTR-149. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin
- Kehr E (1965) 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 (Investigation of the suitability of different wood species and sortiments for the production of particleboards. 7th note: oak, aspen, poplar, hornbeam, elm, larch as well as spruce and pine as references). *Holztechnologie* 6(4):225–232 (**in German**)
- Kehr E, Schilling W (1962) 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 (Investigation of the suitability of different wood species and sortiments for the production of particleboards. 3rd note: the influence of the proportion of hardener on particleboards made of European beech and pine). *Holztechnologie* 3(1):22–28 (**in German**)
- Knauf M, Frühwald A (2015) The future development of the German wood-based panel industry. *Holztechnologie* 56:5–12

- Michanickl A (2007) Entwicklungen beim Holzeinsatz in der Holzwerkstoffindustrie (Recent developments for wood utilization in the wood-based panel industry). Kongress Rohholzmanagement in Deutschland. Kongresszentrum Hannover **(in German)**
- Olmstead R, Zjhra M, Lohmann L, Grose SO, Eckert AJ (2009) A molecular phylogeny and classification of Bignoniaceae. *Am J Bot* 96:1731–1743
- Petersen H, Reuther W, Eisele W, Wittmann O (1972) Zur Formaldehyd-Abspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln (Investigations on the formaldehyde liberation during the manufacture of particle board with urea formaldehyde adhesives. Part I). *Holz Roh-Werkst* 30:429–436 **(in German)**
- Petersen H, Reuther W, Eisele W, Wittmann O (1973) Zur Formaldehydabspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-formaldehyd-Bindemitteln (Further investigations on the formaldehyde liberation during particleboard production with urea formaldehyde adhesives). *Holz Roh-Werkst* 31:463–469 **(in German)**
- Petersen H, Reuther W, Eisele W, Wittmann O (1974) Zur Formaldehydabspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln. Dritte Mitteilung: Der Einfluß von Härterart, Härtermenge und formaldehydbindenden Mitteln (Further investigations on the formaldehyde liberation during particleboard production with urea-formaldehyde-adhesives. Part III). *Holz Roh-Werkst* 32:402–410 **(in German)**
- Rao AN (1986) Paulownia in China: Cultivation and Utilization. Asian Network for Biological Sciences (ANBS) and International Development Research Centre (IDRC), Singapore
- Rein JJ (1889) The Industries of Japan. Together with an Account of Its Agriculture, Forestry, Arts and Commerce. Hodder and Stoughton, London
- Roffael E, Rauch W (1972) Einfluß der Rohdichte auf das Quellungsverhalten von phenolharzgebundenen Spanplatten (Influence of density on the swelling behaviour of phenolic resin bonded particle boards). *Holz Roh-Werkst* 30(5):178–181 **(in German)**
- Roffael E, Dix B, Lelis R (1994) Wechselwirkung zwischen den Holzinhaltsstoffen und Formaldehyd bei der Herstellung von Holzwerkstoffen (Interactions between wood extractives and formaldehyde during the production of wood-based panels). Special print: *Holz-Zentralblatt* 108, WKI-Mitteilung Nr. 618. 1705–1706 **(in German)**
- Sackey EK, Smith GD (2010) Characterizing macro-voids of uncompressed mats and finished particleboard panels using response surface methodology and X-ray CT. *Holzforschung* 64:343–352
- Scatolino MV, Silva DW, Mendes RF, Mendes LM (2013) Use of maize cob for production of particleboard. *Ciênc Agrotec* 37:330–337
- Stegmann G, Kratz W (1967) Kennzeichnung der Verleimungsgüte von Spanplatten mit verschiedenen Bindemittelgehalten und Rohdichten durch Quellungsdruck-Messungen, Ein Beitrag zur Charakterisierung der Quellungsstressungen mit Hilfe einer neuen Messmethodik (Labelling of the quality of glue spread of particleboards with different binding contents and densities caused by swelling pressure-measurements, a contribution to the characterization of swelling parameters by means of a new measurement methodology). *Adhäsion* 11–18 **(in German)**
- Stegmann G, Durst J, Kratz W (1965) Pappelschichtholz als Rohstoff der Spanplattenindustrie (Laminated poplar wood as raw material for the particleboard industry). *Holzforsch Holzverwert* 17:37–43 **(in German)**
- Walther T (2010) Mikrotomographische Untersuchungen an Holzwerkstoffen. In: Vom Holz zum Werkstoff—Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung und Struktur von Holzwerkstoffen (Microtomographic investigations on wood-based panels. In: From wood to material—fundamental studies for production and structure of wood-based panels). Berner Fachhochschule für Architektur, Holz und Bau, Biel **(in German)**
- Welling J (2012) Stoffliche Nutzung von Laubholz—Herausforderung für eine zukunftsfähige Holzverwendung (Material use of hardwood—challenge for a sustainable wood use), 1st edn. Fachagentur Nachhaltigkeits Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prützen **(in German)**
- Wimmer R, Weigl M, Schöneberg S (2009) Holzartenauswahl in der Holzwerkstoffindustrie (Selection of wood species in the wood-based panel industry. Symposium “Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe” on November 17th–18th, 2009. Göttingen, Germany **(in German)**

### 3.2 Publikation 2

#### Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.)

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
 Journal: European Journal of Wood and Wood Products 77:761–769  
 Jahr: 2019  
 DOI: 10.1007/s00107-019-01442-7

#### Autorenschaft nach Clement (2014)

Autoren	Ideen (30 %)	Arbeit (30 %)	Schreiben (30 %)	Verwaltung (10 %)	Beitrag / Verantwortung
P. A. Nelis	70 %	100 %	70 %	20 %	<b>74 %</b>
C. Mai	30 %	0 %	30 %	80 %	<b>26 %</b>

**Ideen:** Konzeption der Untersuchung / Versuchsplanung / Interpretation der Daten

**Arbeit:** Durchführung des Versuchs / Datenaufnahme und -analyse

**Schreiben:** Entwurf des Artikels / kritische, inhaltliche Überarbeitung / Begutachtung der Endfassung

**Verwaltung:** Erschließung von Ressourcen und Gewährleistung der wissenschaftlichen Integrität vor, während und nach der Publikation



# Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.)

Philipp A. Nelis<sup>1</sup> · Carsten Mai<sup>1</sup> Received: 30 August 2018 / Published online: 31 July 2019  
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

## Abstract

The kiri tree produces low-density wood, which serves as an excellent material for particleboards (PB) due to the correspondingly low bulk density of the particles and better glue utilization. In this study, kiri particles (KPs) are used in surface and core layers to explicitly improve certain strength properties of three-layered PBs. Six variants of three-layered PBs were produced from KPs and industrial particles (IPs) with a target density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$ . The composition of the PBs was 100% KPs, 100% IPs, KPs in the surface layer with IPs in the core layer and vice versa, and KPs and IPs, respectively, in the surface layer with a 50/50% mixture of KPs and IPs. KPs in the surface layer improved bending strength and bending MOE for all different core layers. The internal bond strength increased accordingly with the amount of KPs in the core layer. Thickness swelling was lower with KPs in the surface layer for panels with all different core layers. Water absorption was lower with KPs in the surface layer for most of the panels. Density profiles reveal that the variants with lowest density in the core layer do not necessarily show the lowest IB results, which indicates that IB is more dependent on the compression of the particles and resulting enhanced adhesion than on density alone. Screw withdrawal resistance was not affected by the surface layer, but it increased with the overall amount of KPs in the PB.

## 1 Introduction

On March 29, 2000 the German Renewable Energy Sources Act (EEG) came into force. The EEG laid the foundation for an increasing energetic use of wood by reduced sales tax, a market incentive programme and funding of installations (Association of German Wood-based Materials Industry (VHI) 2010; Schwarz 2014). On the one hand, the availability of wood assortments for the wood-based panel industry was reduced as it was economically favourable to consider thermal instead of material utilization of wood, which led to a price increase for wood assortments used for particleboards (PBs) (Ludwig et al. 2016). On the other hand, the wood-based panel industry benefits from the recent price decrease for gas and oil as it reduces the competitiveness of the thermal utilization of wood. Fast-growing trees like kiri

(*Paulownia* spp.) could enhance the raw material supply and help reduce the shortage of wood assortments the industry is currently facing.

*Paulownia*, introduced to France in 1837 (Rein 1889), is commonly used as ornamental tree. Common names are empress-, princess- or kiri tree. Gardeners and landscape architects appreciate the genus for its fast growth and beautiful flowers in springtime. The genus *Paulownia* prefers sunny places and is most suited to loose sandy and clayey soils with good drainage. Wetness due to dammed-up water and high groundwater levels should be avoided (Rao 1986).

Lightness of products is a cross-industry topic. Various companies have expanded their range of products by lightweight panels years ago. The automotive industry has put a lot of effort into reducing weight to lower fuel consumption or achieve higher loading capacities. In the furniture industry, low-weight products are highly appreciated by processors and customers. The widespread customer perception that good products have to weigh much is changing. Kiri has a density between 260 and  $330 \text{ kg m}^{-3}$  (Rao 1986) and is therefore benefitting from these developments towards lightness. Recently, Hülsta, a German design furniture brand, has started using kiri wood. They use a kiri solid wood core layer

✉ Carsten Mai  
cmai@gwdg.de

<sup>1</sup> Wood Biology and Wood Products, Burckhardt Institute, University of Goettingen, Büsengweg 4, 37077 Göttingen, Germany

with different veneer surface layers, to be sold as super light solid wood product. Kiri is also commonly used for windows, doors, furniture, musical instruments and it is appreciated in the surf- and snowboard industry. In China, the use of kiri has a very long history. The oldest document on kiri is “A monograph of *Paulownia*”, which was published in 1049 BC describing the method of cultivation and the utilization of kiri timber (Rao 1986).

In Germany and many other countries (Italy, Spain, Romania, Bulgaria etc.), the kiri tree has been recognized as an excellent plantation tree. In 2010, with the amendments of the German Federal Forest Act (GFFA), short-rotation plantations are not considered as forests in Germany (GFFA §1 Number 1 2017) but keep the status of an agricultural area as long as rotation periods of the planted trees do not exceed 20 years. Within this time, one harvest must be undertaken. It is not regulated by law how long, in general, such a short rotation plantation can be managed. For some species, such as poplar and willow tree, funding from the state can be requested. So far, kiri is not eligible for financial support (DirektZahlDurchfV Part 1 §3 annex 1 2018).

Regarding kiri, the first harvest of low-dimensional timber can be pursued after 5 years (Rao 1986). The rotation period is between 12 and 15 years. The aim of most kiri plantations is to produce valuable timber with diameters between 40 and 60 cm for material use, unlike most poplar plantations, where an energetic use is pursued. On German plantations, diameters between 25 and 35 cm are obtained after 6 years. Constant pruning, fertilization and irrigation is necessary to yield best quality timber on a kiri plantation. Still, in the past 10 years the price for agricultural land has constantly increased (German Federal Statistical Office 2016) and thus, economically appropriate areas in Germany are difficult to find. Nevertheless, kiri plantations are often cultivated by farmers on agricultural land and thus, it is important to shed light on the farmer's point of view. Farmers face several difficulties cultivating kiri for the first time: the situation is economically tense, because of high investment costs for cultivating and maintenance of such plantations. In addition, revenue is not generated in the following year as farmers are used to, concluding other financing methods have to be considered. Limited durations of the lease agreements for agricultural areas play their part in the difficult search for appropriate plantation land.

Kiri wood has not been used to produce PBs on industrial scale. Only few references are available on lab-scale production of PBs (Clad and Pommer 1980; Kalaycioglu et al. 2005; Akyildiz and Kol 2010; Nelis et al. 2018). A previous study revealed that kiri wood can improve the performance of one-layered PBs (Nelis et al. 2018). Increased proportions of kiri particles (KPs) in a mixture with industrial particles (IPs) steadily increased the mechanical properties of the boards. This study focuses on the production of three-layered

PBs consisting of different surface and core layers of KPs and IPs to determine the effect of kiri and mixtures of KPs and IPs in corresponding layers on various properties of the boards.

## 2 Experimental

### 2.1 Wood particles

Log pieces and branches with diameters of 5–40 cm from kiri trees (*Paulownia* spp.) were provided by WeGrow GmbH (Bonn, Germany). They were debarked manually and chopped into chips with a chopper (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). These chips were further chipped to particles with a knife ring flaker (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). Screening of the kiri particles (KPs) was carried out with a tumbler screener (Allgaier, Udingen, Germany). Industrial core-layer wood particles were obtained from Sonae Arauco Deutschland GmbH (Nettgau, Germany) and are referred to as industrial particles (IPs). They consisted of 80% fresh wood (50% softwood, 50% hardwood) and 20% recycling wood. A part of these industrial particles was further reduced in size in a hammer mill to produce surface layer particles (Retsch, Haan, Germany). The size distribution of surface and core layer particles was determined via sieve analysis using the sieving device KS1000 (Retsch, Haan, Germany) and then used to produce PBs with the same particle size distributions both for KPs and IPs. Fractions from 0 up to > 2 mm were used for the surface layer of all PBs. Fractions separated for the core layer ranged from > 0.4 mm to > 4 mm. All KPs and IPs were dried to < 5% moisture content in a timber dryer (HB Drying Systems, Almelo, The Netherlands).

### 2.2 Panel manufacturing

Six variants of three-layered PBs with a target density of  $500 \text{ kg m}^{-3}$  were produced (Table 1). The compositions of surface and core layers were the same for all boards produced (Table 2). The ratio of surface layer to core layer particles was 40–60%. The surface layer particles were resinated with 10% and the core layer particles with 8% ( $\text{wt}_{\text{dry resin}} / \text{wt}_{\text{dry particles}}$ ) urea–formaldehyde (UF) resin Kauramin K350 (BASF AG, Ludwigshafen, Germany) with a solid content of 66.9% in a rotating drum blender. A 33% solution of ammonium sulphate (AppliChem GmbH, Darmstadt, Germany) with a load of 2% ( $\text{wt}_{\text{dry solution}} / \text{wt}_{\text{dry resin}}$ ) was added to the resin as a hardener. The resinated particles were formed into a mat ( $450 \times 450 \text{ mm}^2$ ), cold pre-pressed and subsequently hot-pressed at  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $6.81 \text{ N mm}^{-2}$  for  $12 \text{ s mm}^{-1}$  using metal bars as stops to ensure a target thickness of 17 mm. Three PBs were produced for each of the six variants. After

**Table 1** Composition and names of various PB variants

	Names of particleboard variants					
	KP/KP	IP/KP	IP/IP	KP/IP	KP/50	IP/50
Surface layer (%)	100 KP	100 IP	100 IP	100 KP	100 KP	100 IP
Core layer (%)	100 KP	100 KP	100 IP	100 IP	50 KP 50 IP	50 KP 50 IP

The first part of the name indicates the surface layer particle raw material and the second part indicates the core layer raw material

**Table 2** Composition of surface and core layers

	Surface layer fractions (mm)					Core layer fractions (mm)			
	<0.5	>0.5	>1.0	>1.6	<2.0	>0.4	>1.6	>3.15	>4.0
Share (%)	19.1	42.3	35.7	2.0	0.3	26.6	23.7	39.2	10.5

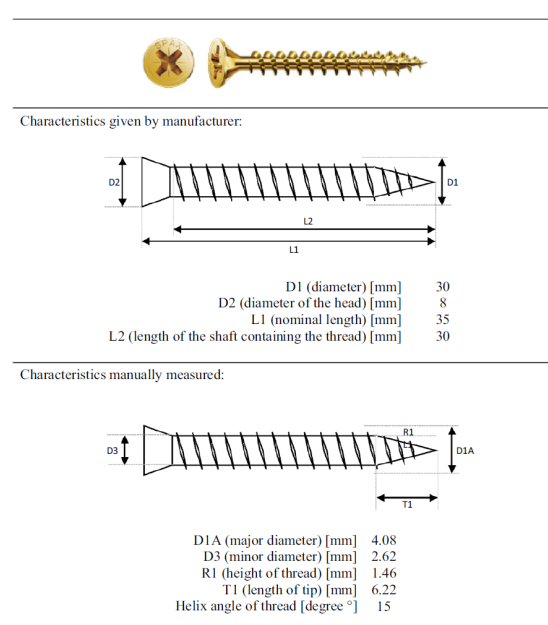
the hot-pressing process, the PBs were cooled at room temperature, sanded to a thickness of 16 mm and cut to dimensions of 390×390 mm<sup>2</sup>. Then, the PBs were cut into various specimens according to a cutting plan following EN 326-1 (1994).

### 2.3 Physico-mechanical properties

All specimens were conditioned to constant mass at 20 °C and 65% relative humidity, leading to a specimen moisture content of 10–11%. Density of all specimens was determined according to EN 323 (1993). Bending strength (modulus of rupture, MOR) and modulus of elasticity in bending (MOE) were determined according to EN 310 (1993) (4 specimens per board, n = 12). Internal bond strength (IB) was determined according to EN 319 (1993) (n = 10). Thickness swelling (TS) was assessed after 2, 24 and 72 h immersion in water at 20 °C following EN 317 (1993) (5 specimens per board, n = 15). In addition, the relative and absolute water uptake was determined after 2, 24 and 72 h immersion in water. All specimens were randomly selected within their variation group (500 kg m<sup>-3</sup> ± 5%).

Screw withdrawal resistance (SWR) was determined following EN 320 (1993). The number of replicates (n) varied between the different PB variants due to specimen selection based on a density area of 500 kg m<sup>-3</sup> ± 7.5% for SPAX universal screws (SPAX International GmbH & Co. KG, Ennepetal, Deutschland) with dimensions of 4.0 mm (d) × 35 mm (l). Additionally, the exact D1, D2 and length of tip were determined with a calliper (Fig. 1). The type “SPAX universal” was selected because it is frequently used for PBs.

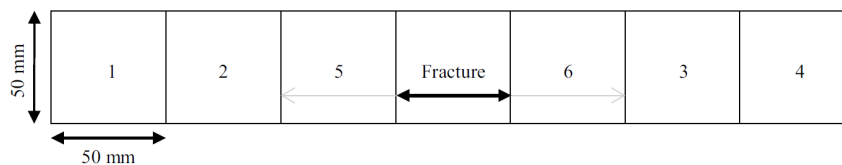
For methodological reasons, it was studied whether a preceding bending strength test might affect the SWR compared to sound particleboard specimens. The test was performed with specimens of 50 × 50 mm<sup>2</sup> dimensions. After testing of the MOR, fracture areas of the corresponding



**Fig. 1** Several characteristics of SPAX universal screws (Phillips-recess Z2, flat countersunk head, zinc yellow passivated A2L). Top image by: SPAX International GmbH & Co. KG

specimens were cut off (Fig. 2). From the fractured test specimen, 4–6 specimens (depending on the fracture pattern) were produced with dimensions of 50 × 50 mm<sup>2</sup>.

SWR was tested on three sides: screws were located in the top (*face*) and in two adjoining sides (*side 1* and *side 2*). The screws were manually screwed into the specimen without pre-drilling until they reached a depth of 15 mm. MOR, MOE, IB and SWR were determined by means of the universal testing machine (Zwick/Roell, Ulm, Germany).



**Fig. 2** Fractured bending test specimen. Sections 1 to 4 were not affected by fracture pattern and used as SWR specimen; sections 5 and 6 were sometimes not affected and correspondingly used and the fracture section was always cut out

## 2.4 Density profiles

Density profiles of the PBs were recorded by means of the X-ray device DAX (Grecon, Alfeld, Germany) using a specimen size of  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . The scanning speed was set to  $1 \text{ mm s}^{-1}$  with a resolution of 0.02 mm. Each density profile consisted of approximately 800 individual measurements. The mean density profiles were generated by overlaying individual profiles of corresponding specimens. The number of individual profiles for the mean density profile of the six PB variants varied because of specimens' selection criteria of maximum density variation of  $500 \text{ kg m}^{-3} \pm 5\%$  (KP/KP  $n=34$ , IP/KP  $n=50$ , IP/IP  $n=32$ , KP/IP  $n=37$ , KP/50  $n=52$ , IP/50  $n=49$ ). Surface and core layer thicknesses were calculated based on the thickness of the PB after sanding (16 mm) and the corresponding surface to core layer ratio of 40–60%. Calculated thicknesses of the surface layer were 3.2 mm and of the core layer 9.6 mm. Mean density of surface and core layers was calculated from the DAX dataset. The mean density of the upper surface layer was calculated from a thickness of 0–3.18 mm (159 values), the core layer from 3.2 to 12.98 mm (490 values) and the lower surface layer from 13 to 16.2 mm (161 values).

## 2.5 Statistical analysis

Significant differences between group means for physico-mechanical properties of the PB variants were determined using One-way ANOVA and Kruskal–Wallis-test. Normal distribution was first assessed by visualisation of probability plots for residuals, and then, in the case of an unclear result, Shapiro–Wilk test was performed additionally. Levene's test was used to test for homogeneity of variances. In the case of normal distribution and homogeneity of variances, the multiple comparison test Tukey HSD was performed. If the criteria were not met ( $p$ -level of 0.05), a Kruskal–Wallis-test was performed.

## 3 Results and discussion

### 3.1 Modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)

All PB variants could be produced without technical problems. PBs made of 100% KPs (KP/KP) displayed significantly higher values for MOR and MOE than those based on 100% IPs (IP/IP, Fig. 3). Considering the different core layers (KP, IP, 50), KP in the surface layers positively influenced MOR and MOE. MOR and MOE of KP/IP and IP/KP do not differ significantly. This leads to the assumption that the MOR is only little influenced by the localisation of the wood material (surface layer vs. core layer), but strongly determined by the percentage of KP. As all types of particles exhibited the same size distribution, higher strength is attributed to the lower bulk density of the raw material. The higher the percentage of KPs in a PB, the higher the MOR and MOE:  $\text{IP/IP} < \text{IP/50} < \text{KP/IP} < \text{KP/50} < \text{KP/KP}$ . Nelis et al. (2018) showed similar results for one-layered PBs with a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$ . A comparison of the variants IP/IP and KP/IP also indicates that the replacement of IP in the surface layer with KP also strongly enhances MOR and MOE. Thus, MOR and MOE of three-layered PBs can be improved significantly by using KP in the core or surface layers.

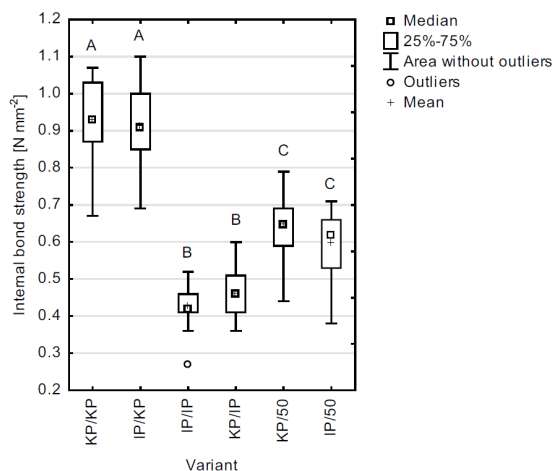
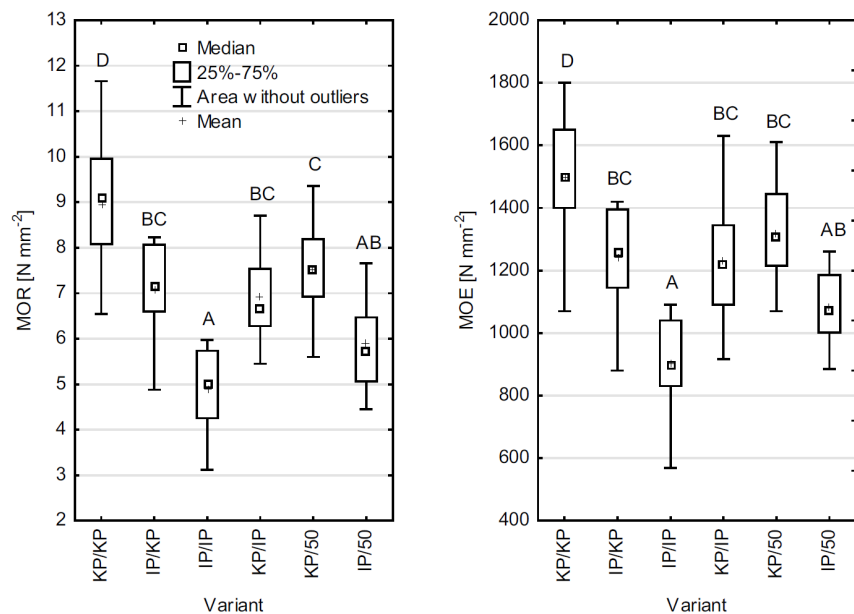
According to DIN CEN/TS 16368 (2014), all variants met the MOR ( $3.5 \text{ N mm}^{-2}$ ) and MOE requirements ( $500 \text{ N mm}^{-2}$ ) of board type LP1. KP/KP, IP/KP and KP/50 met the MOR requirements ( $7 \text{ N mm}^{-2}$ ) for board type LP2 and all variants but IP/IP met the MOE requirements for LP.

### 3.2 Internal bond strength (IB)

Internal bond strength increased with increasing percentage of KPs in the core layer (Fig. 4). PBs with KPs in the



**Fig. 3** MOR (left) and MOE (right) of six variants (n = 12) of PBs. Different letters indicate significant differences between PB variants



**Fig. 4** Internal bond strength of six variants of PBs (KP/KP n=30, IP/KP n=29, IP/IP n=30, KP/IP n=29, KP/50 n=27, IP/50 n=27). Different letters indicate significant differences between PB variants

core layer exhibited significantly higher values than those based on IPs and a 50%-mixture of KPs and IPs (denoted 50s). The surface layer did not influence IB significantly. Failure occurred in the core layer. According to DIN CEN/TS 16368 (2014), all variants met the requirements of board types LP1 ( $0.24 \text{ N mm}^{-2}$ ) and LP2 ( $0.3 \text{ N mm}^{-2}$ ). According to EN 312 (2010), IP/KP boards and KP/KP boards met the requirements for the board types P1 ( $0.24 \text{ N mm}^{-2}$ )–P7 ( $0.7 \text{ N mm}^{-2}$ ), KP/50 and IP/50 for P1–P6 ( $0.5 \text{ N mm}^{-2}$ ),

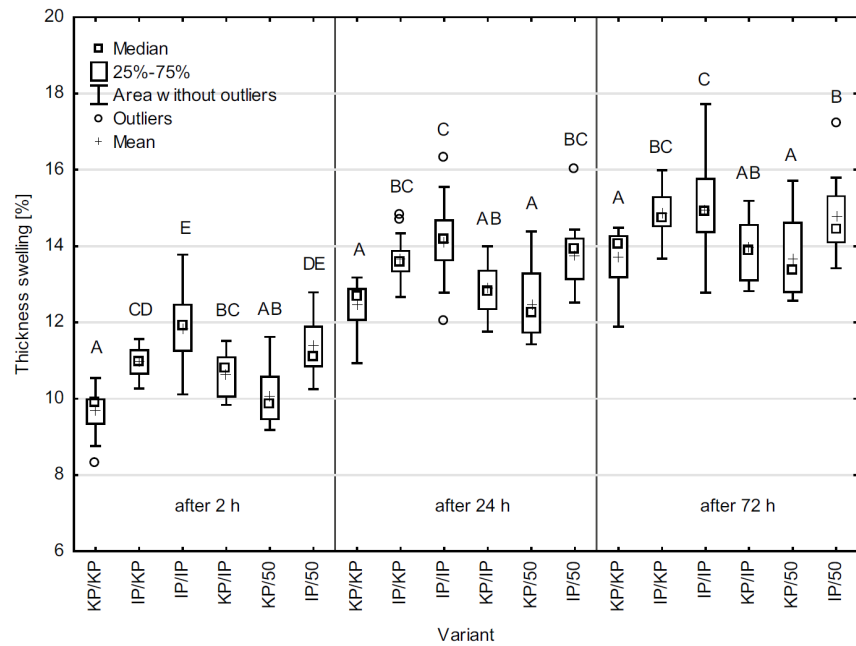
KP/IP for P1–P5 ( $0.45 \text{ N mm}^{-2}$ ) and IP/IP met the requirements for board types P1, P2 ( $0.35 \text{ N mm}^{-2}$ ) and P4 ( $0.35 \text{ N mm}^{-2}$ ).

In a previous study, a proportion of only 33% KPs almost reduplicated the IB of one-layered PBs with a density of  $350 \text{ kg m}^{-3}$  compared to PBs based on 100% IPs (Nelis et al. 2018). The IB results of this study show higher values than those obtained by Kalaycioglu et al. (2005). Possible reasons for this could be different production parameters, such as higher temperature ( $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and pressure ( $2.6 \text{ N mm}^{-2}$ ) during pressing in this study. The high IB of the PBs based on KPs is attributed to the high compression ratio, and thus, a better effectivity of the glue due to more contact points between the individual particles.

### 3.3 Thickness swelling (TS) and relative water absorption (WA)

TS after 2, 24 and 72 h immersion in water increased with increasing proportion of IPs (Fig. 5). KP/KP and KP/50, containing the highest proportions of KPs, displayed the lowest TS after 2, 24 and 72 h immersion in water. IP/IP boards showed highest TS after 2, 24 and 72 h. TS after 2 h was significantly lower for PBs containing KPs in the surface layers. The PBs revealed the greatest differences between the six variants after 2 h. All PB variants, except IP/IP, met the requirements for TS after 24 h immersion for board type P3 (14%) and all met the requirements for board type P4 (15%) according to EN 312 (2010). In general, KPs positively influenced TS properties of PB. Nelis et al. (2018)

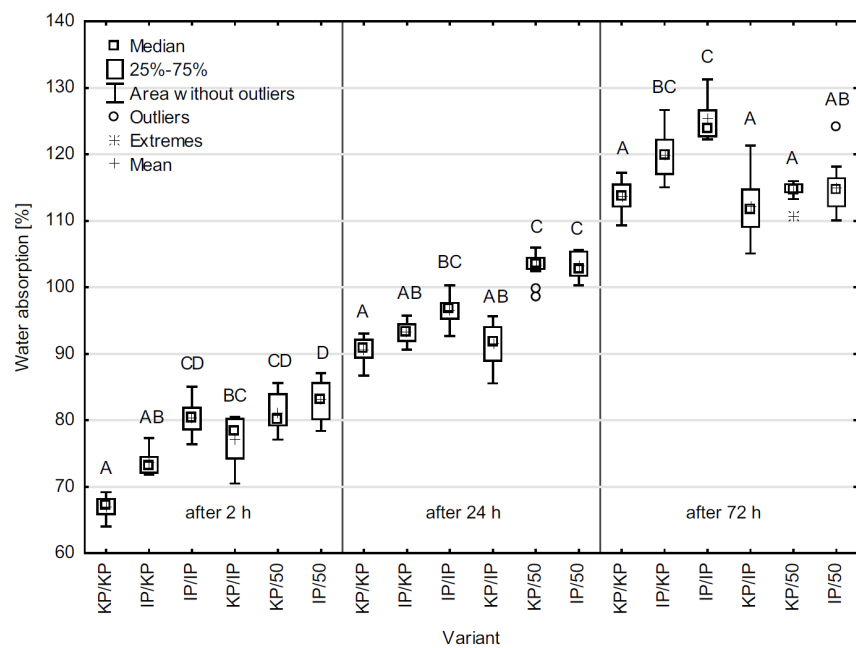
**Fig. 5** Percentage thickness swelling of six variants of PBs after 2, 24 and 72 h immersion in water (n = 20). Different letters mark significant differences between PB variants within their group (after 2, 24 and 72 h)



assumed that the high IB of these PBs counteracted TS. Surface layer consisting of KPs caused significantly reduced TS. An influencing factor could be the higher compression of the particles due to their lower bulk density, resulting in lower pore size (Nelis et al. 2018) and might cause

minor penetration of water into the surface. KP/KP boards revealed the lowest relative WA (based on the mass of the PBs) after 2 and 24 h immersion in water (Fig. 6). Comparing boards with the same core layer after 2 h immersion revealed that PBs containing KPs in the surface layer showed

**Fig. 6** Percentage water absorption of six variants of PBs after 2, 24 and 72 h immersion in water (n = 20). Different letters mark significant differences between PB variants within their group (2, 24, 72 h)



lower relative WA than those with IPs in the surface layer, although the differences were not significant. PBs containing IP/IP, IP/50 and KP/50 displayed the highest relative WA. After 24 h immersion, KP/KP exhibited significantly lower values than IP/IP, KP/50 and IP/50. PBs with mixed core layer (50s) showed the highest values both for KPs and IPs in the surface layer. After 72 h immersion, IP/IP exhibited the significantly highest relative WA, while KP/KP boards did not reveal significant differences compared to variants KP/IP, KP/50 and IP/50.

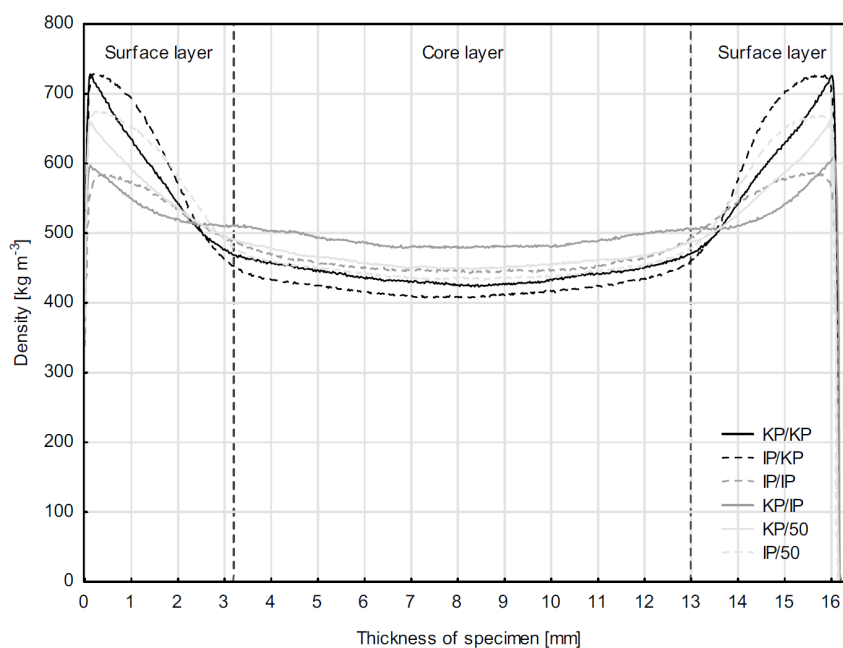
Comparing TS and relative WA, it was observed that the results of PBs with mixed core layers differed a lot after 2 and 24 h immersion. Here, a similar WA caused very different TS. For KP/50 a much lower relative WA was expected due to the high amount of KPs in the PB and the corresponding better glue utilization. It is presumed that the IPs in the core layer caused the formation of larger voids (Nelis et al. 2018), which were filled, but the water was not yet taken up by the wood particles. Thus, water in these voids had no direct effect on TS, but on the weight of the specimens after 2 and 24 h immersion in water.

### 3.4 Density profiles

The main characteristics of density profiles of PBs were observed for all six variants, involving increase in density from core to surface layers with maxima in the surface layers and a flat curve with minimum density in the core layer (Fig. 7). Comparing the same core layers, surface layers of IPs were more densified than those of KPs (Table 3). The profiles also showed a different shape. While the density profile of PBs with IPs in the surface layers exhibited a concave descent, those with KPs in the surface layers displayed a slightly convex descent. From a depth of approximately 2.5 mm on, all variants with KPs in the surface layers showed a higher densification in the core layer than those with IPs in the surface layer.

For variants with the same core layer, less densification in the core layers results in higher densification in the surface layer. IP/KP exhibited the lowest density in the core layer. This variant displayed the second highest IB mean value of all variants. KP/KP showed the second lowest density in the core and the highest IB mean value. Thus, the density in

**Fig. 7** Mean density profiles of six variants of PBs



**Table 3** Mean densities of surface and core layers obtained from mean density profiles of six different variants of PBs

	Mean density of different PB layers ( $\text{kg m}^{-3}$ )					
	KP/KP	IP/KP	IP/IP	KP/IP	KP/50	IP/50
Upper surface layer	582	607	541	535	560	596
Core layer	441	423	456	490	462	447
Lower surface layer	579	615	547	534	554	582

the core layer is not the main influencing factor for IB. The adhesion among the particles, which depends on the extent of contact areas between particles and adhesive, seems to be far more crucial. Density of the core layer is only the most important factor to determine IB, if the core layer contains the same wood material and all other factors (e.g. adhesive) are consistent.

### 3.5 Screw withdrawal resistance (SWR)

Statistical analysis revealed that for all variants, except IP/50 Top, SWR was not affected by preceding bending test (Table 4).

With respect to the orientation *Face*, the highest SWR was observed for KP/KP boards, while IP/IP boards showed

the lowest SWR (Fig. 8). The variants IP/IP, IP/50 and KP/KP were significantly different, which indicated that the wood material has a significant impact on the SWR. 50% of KP in the core layer increased the SWR significantly. The higher strength can mainly be attributed to more effective glue utilization due to the lower bulk density and the resulting stronger compaction of KPs. SWR of KP/IP boards was not significantly different from that of IP/IP; SWR of KP/50 was not significantly different from IP/50, and SWR of KP/KP was not significantly different from that of IP/KP. These comparisons indicate that the surface layer has no relevant influence on SWR. Still, a trend was identified that KPs in the surface layer led to slightly higher SWR. KP/50 contains a 10% higher proportion of KPs but showed very similar results to IP/KP.

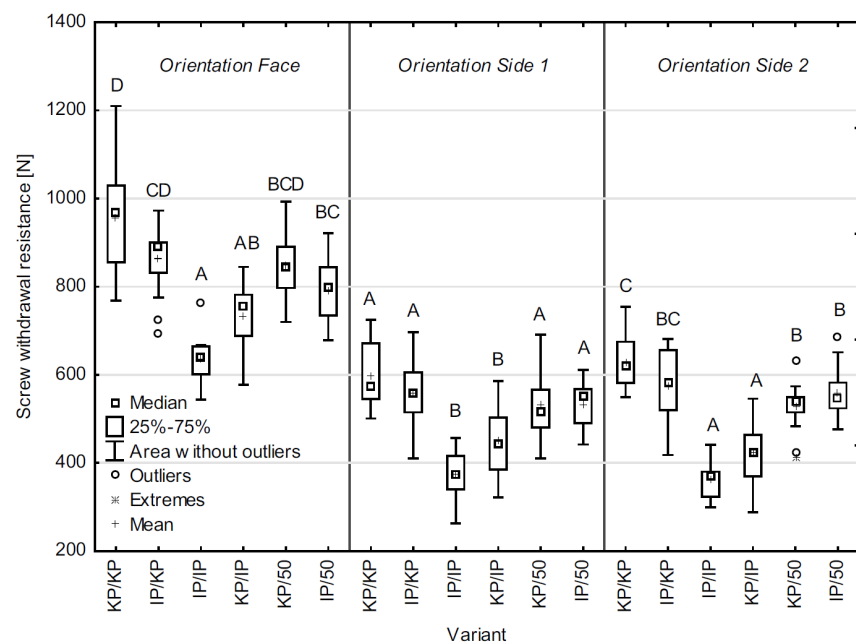
SWR for *Side 1* and *Side 2* did not show significant differences between the two groups (Fig. 8). This result was expected, because the particles of the core layer were not oriented, so basically both sides consisted of the same material. As the screws were positioned only in the core layer, the surface layer did not contribute to SWR. Regarding *Side 1*, KP/KP showed the highest values. Still, statistical analysis did not reveal significant differences between the variants KP/KP, IP/KP, KP/50 and IP/50. Comparing IP/IP and IP/50 indicated that admixing 50% of KPs to the core layer increased SWR significantly. Comparing IP/50 to IP/KP showed that a further increase of KPs in the core layer did not increase SWR significantly. *Side 2* revealed comparable

**Table 4** Significant differences (p-values) in SWR for SPAX universal with and without bending impact with regard to Face, Side 1 and Side 2 orientation

Variant	SPAX universal		
	Orientation		
	Face	Side 1	Side 2
KP/KP	<i>0.58</i>	<i>0.34</i>	<i>0.81</i>
IP/KP	<i>0.31</i>	<i>0.2</i>	<i>0.63</i>
IP/IP	<i>0.41</i>	<i>0.19</i>	<i>0.12</i>
KP/IP	<i>0.27</i>	<i>0.17</i>	<i>0.87</i>
KP/50	<i>0.18</i>	<i>0.09</i>	<i>0.47</i>
IP/50	<i>0.02</i>	<i>0.66</i>	<i>0.05</i>

Italicised values mark no significant difference

**Fig. 8** Screw withdrawal resistance for SPAX universal screws of six variants of PBs and three different orientations. Different letters mark significant differences between PB variants within their group (Face, Side 1 and Side 2)



results, except for KP/KP, which displayed significantly higher SWR compared to all variants, except for IP/KP.

#### 4 Conclusion

Three-layered PBs from KPs with a density of 500 kg m<sup>-3</sup> can be produced without technical problems and exhibit higher strengths than those based on conventional IPs. The variants with lowest density in the core layer do not necessarily show the lowest IB results, which indicates that IB is more dependent on the compression of the particles and the resulting enhanced adhesion than on density alone. Bending strength and MOE show significantly higher values when the surface layer is composed of KP. The surface layer does not significantly influence SWR, but a higher overall amount of KPs in a PB led to higher SWR. KPs in the surface layer cause significantly lower TS of corresponding specimens comparing the same core layers. Admixture of kiri particles to conventionally used industrial particles clearly improves the physico-mechanical properties of three-layered PB. It cannot only be considered a new source of raw material, but also be used to specifically enhance certain characteristics by using it as surface or core layer material.

**Acknowledgements** The authors wish to acknowledge funding by the AiF Projekt GmbH (Project No. KF2454610WZ4) as well as the provision of *Paulownia* wood from the WeGrow GmbH.

#### References

- Akyildiz MH, Kol HS (2010) Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *J Environ Biol* 31:351–355
- Association of German Wood-based Materials Industry (VHI) (2010) Fragen und Antworten zur Forderung der Kaskadennutzung von Holz (Questions and answers regarding the claim of cascade use) **(in German)** (document published in the course of EPF-Aktionstag on October 29, 2010)
- Clad W, Pommer E-H (1980) Particleboard from Kiri (*Paulownia tomentosa*, Fam. Scrophulariaceae). *Holz Roh- Werkst* 38:385–391
- DIN CEN, TS 16368, (2014) Lightweight particleboards—specifications. German version. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DirektZahlDurchfV Part 1 §3 annex 1 (2018) Verordnung zur Durchführung der Direktzahlungen an Inhaber landwirtschaftlicher Betriebe im Rahmen von Stützungsregelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (Direktzahlungen-Durchführungsverordnung-DirektZahlDurchfV) (Regulation on the implementation of direct payments to holders of agricultural farms under support schemes in the framework of the common agricultural policy) **(in German)**, <https://www.gesetze-im-internet.de/direktzahldurchfv/BJNR169000014.html>. Accessed 14 Feb 2019
- EN 310 (1993) Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 312 (2010) Particleboards—specifications; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 317 (1993) Particleboards and fibreboards; determination of swelling in thickness after immersion in water; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 319 (1993) Particleboards and fibreboards; determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 320 (1993) Fibreboards—determination of resistance to axial withdrawal of screws; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 323 (1993) Wood-based panels; determination of density; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 326-1 (1994) Wood-based panels—sampling, cutting and inspection—part 1: sampling and cutting of test pieces and expression of test results; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- German Federal Statistical Office (2016) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei-Kaufwerte für landwirtschaftliche Grundstücke (Agriculture and forestry, fisheries—purchase value of agricultural properties); Fachserie 3 Reihe 2.4
- GFFA §2 Number 1 (2017) Deutsches Bundeswaldgesetz §2 Absatz 1 (German Federal Forest Act §2 Number 1). <https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html>. Accessed 14 Feb 2019
- Kalaycioglu H, Deniz I, Hiziroglu S (2005) Some of the properties of particleboard made from paulownia. *J Wood Sci* 51:410–414
- Ludwig G, Gaweł E, Pannicke N (2016) Kaskadennutzung von Holz: Bestandsaufnahme, Rechtsrahmen und Reformvorschläge für die Altholzverwertung in Deutschland (Cascade use of wood: inventory, legal framework and reform proposals for utilization of wood waste in Germany). Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ **(in German)**
- Nelis PA, Michaelis F, Krause KC, Mai C (2018) Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards? *Eur J Wood Prod* 76:445–453
- Rao AN (1986) Paulownia in China: cultivation and utilization. Asian Network for Biological Sciences (ANBS) and International Development Research Centre (IDRC), Singapore
- Rein JJ (1889) The industries of Japan. Together with an account of its agriculture, forestry, arts and commerce. Hodder and Stoughton, London
- Schwarz A (2014) Infobrief vom Deutschen Bundestag: Die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland—Hintergründe und Entwicklungen. (Info letter by the German Bundestag: funding of electricity from renewable energy sources in Germany—background and developments) Infobrief WD 5-3010-109/13

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

### 3.3 Publikation 3

#### The influence of low-density (*Paulownia* spp.) and high-density (*Fagus sylvatica* L.) wood species on various characteristics of light and medium-density three-layered particleboards

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
 Journal: Wood Material Science & Engineering  
 Jahr: 2019  
 DOI: 10.1080/17480272.2019.1659850

#### Autorenschaft nach Clement (2014)

Autoren	Ideen (30 %)	Arbeit (30 %)	Schreiben (30 %)	Verwaltung (10 %)	Beitrag / Verantwortung
P. A. Nelis	70 %	100 %	70 %	40 %	<b>76 %</b>
C. Mai	30 %	0 %	30 %	60 %	<b>24 %</b>

**Ideen:** Konzeption der Untersuchung / Versuchsplanung / Interpretation der Daten

**Arbeit:** Durchführung des Versuchs / Datenaufnahme und -analyse

**Schreiben:** Entwurf des Artikels / kritische, inhaltliche Überarbeitung / Begutachtung der Endfassung

**Verwaltung:** Erschließung von Ressourcen und Gewährleistung der wissenschaftlichen Integrität vor, während und nach der Publikation

## ORIGINAL ARTICLE



## The influence of low-density (*Paulownia* spp.) and high-density (*Fagus sylvatica* L.) wood species on various characteristics of light and medium-density three-layered particleboards

Philipp Alexander Nelis and Carsten Mai

Department of Wood Biology and Wood Products, University of Goettingen, Göttingen, Germany

**ABSTRACT**

This study investigates the influence of wood densities on moduli of rupture and elasticity, internal bond strength, surface soundness and density profiles of light and medium-density three-layered particleboards (PB). Therefore, particles of low and high-density wood species in three-layered PB were combined. Different combinations of beech (*Fagus sylvatica* L.) as high-density wood species and kiri (*Paulownia* spp.) as low-density wood species were used as material for the core and surface layers of PBs with target densities of 500 and 650 kg/m<sup>3</sup>. The results of all tests were influenced by the interaction of two effects: the different densities of the raw materials and the different level of compaction (effectiveness of glue utilization). For target density 500 kg/m<sup>3</sup>, the compaction of the kiri particles had a greater influence on strength results, than the higher density of the beech raw material. With increasing the target density from 500 to 650 kg/m<sup>3</sup>, a shift of the dominating effect occurred from effective glue utilization due to compaction towards the effect of the raw material density. The low-density raw material showed minor percentage changes than the high-density raw material.

**ARTICLE HISTORY**

Received 12 June 2019  
Revised 29 July 2019  
Accepted 21 August 2019

**KEYWORDS**

Raw material; particleboard; mechanical strength; density profiles; compaction ratio; *Paulownia*

**Introduction**

Particleboards (PB) were developed to increase the utilization yield of trees and to use by-products of the saw mill industry. In 2015, PBs are the quantitatively most important panels of the wood-based panel industry in Europe with 29.1 million m<sup>3</sup> annual production (EPF 2016). In the 1930s, the Himmelheber–Schmid–Wyss group were the first to conduct active research on a predecessor of what nowadays is called PB. Independently Eric Pfohl patented the first three-layer PB (Wyss 1981). From 1955 to 1972, the mean density of industrially produced PBs constantly increased from 570 to 720 kg/m<sup>3</sup> (Kehr and Jensen 1975). Therefore, Kehr and Jensen demanded a change towards lower densities along with the mandatory rationalization due to the rising global raw material shortage. According to Clad (1982), Schulz suggested in 1970 that great efforts should be made to reduce compaction in order to keep a low weight of the panels. Since then, many researchers focussed on reducing the weight of PBs, while keeping desired properties, by different means, i.e. use of lightweight wood species (Clad and Pommer 1980, Akrami *et al.* 2014, Nelis *et al.* 2018), using different materials as core layers such as popcorn (Burnett and Kharazipour 2018) or expandable polystyrene granulates (Shalhafan *et al.* 2016) or using natural and expandable resins such as sour cassava starch (Monteiro *et al.* 2016). Producing PBs with the lowest density possible is a highly relevant topic and an ongoing trend (Lengyel *et al.* 2017). It is long known that wood density strongly influences mechanical properties of wood (Kollmann 1951), but Keylwerth (1958) was the first to

consider PBs as a three-layer element, where the density of each layer has a high influence on the mechanics of the entire panel. Klautitz and Stegmann (1958) evaluated the suitability of low-density poplar wood for one-layered PBs in comparison to, inter alia, high-density wood species like beech. Due to current developments, it becomes interesting to understand, how low-density and high-density wood species as raw materials perform and interact in PBs with reduced density.

These developments involve trends towards PBs with reduced density on the one hand and increasing availability of hardwood species such as beech on the other hand. The former is attributed to efforts to use fast-growing low-density plantation species such as *Paulownia* spp. and the latter to forest conversion towards mixed stands in several European countries. Thus, the main objective of this research was to combine particles of low-density and high-density tree species in three-layered PBs. Various combinations of beech (*Fagus sylvatica* L.) as high-density wood species and kiri (*Paulownia* spp.) as low-density wood species were used as material for the core layer and the surface layers of produced PBs, respectively. Mechanical properties were determined and interpreted by means of density profiles.

**Material and methods****Wood particles**

Log pieces and branches with diameters of 5–40 cm of a kiri trees (*Paulownia* spp.) grown in Germany were provided by

WeGrow GmbH (Bonn, Germany) with a mean density of  $276 \text{ kg/m}^3$  at  $20^\circ\text{C}$  and 65% relative humidity. They were debarked manually and chopped into kiri chips with a chopper (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). Beech wood (*F. sylvatica* L.) was purchased from Jordan GmbH (Kassel, Germany) and cut to wood pieces with dimensions of  $100 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$  for further processing to chips. The mean density of the beech wood was  $698 \text{ kg/m}^3$ . The kiri and beech chips were further chipped to particles with a knife ring flaker (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). The classification of the particles was carried out with a tumbler screener (Allgaier, Uhingen, Germany). Particles to be used for the surface layer were separated into five fractions and those for the core layer into four fractions. Then, all particles were dried to <5% moisture content in a timber dryer (HB Drying Systems, Almelo, Netherlands). The proportional particle size distribution of the surface and core layer was defined via sieve analysis using the sieving device KS1000 (Retsch, Haan, Germany). These distributions were used to establish the composition of the different fractions of surface and core layer in order to obtain the same particle size distribution in all PBs produced (Table 1).

### Panel manufacturing

Four variants of three-layered PBs with target densities of 500 and  $650 \text{ kg/m}^3$  each were produced. Regarding variant names, the first part of the name indicates the surface layer raw material and the second part indicates the core layer raw material (Table 2). The ratio of surface layer to core layer particles was 40–60%. The surface layer particles were resinated in a rotating drum blender with 10% and the middle layer particles with 8% ( $\text{wt}_{\text{dry resin}}/\text{wt}_{\text{dry particles}}$ ) Kauramin K350 UF resin (BASF AG, Ludwigshafen, Germany) with a solid content of 66.9%. A 33% solution of ammonium sulphate with a load of 2% ( $\text{wt}_{\text{dry solution}}/\text{wt}_{\text{dry resin}}$ ) was added to the resin as a hardener. The resinated particles were formed into a mat ( $450 \times 450 \text{ mm}^2$ ) and were cold pre-pressed before the mat was hot-pressed at  $200^\circ\text{C}$  and  $6.81 \text{ N/mm}^2$  for 12 s/mm using stops to ensure a target thickness of 17 mm. Three PBs were produced for each of the four variants. After the hot-pressing process, the PBs were cooled to room temperature, sanded to a thickness of 16 mm and cut to dimensions of  $390 \times 390 \text{ mm}^2$ . Then, PBs were cut into various specimens following a modified cutting plan of EN 326-1 (1994).

### Mechanical properties

All specimens were conditioned to constant mass at  $20^\circ\text{C}$  and 65% relative humidity. Density was determined according to

**Table 2.** Composition of different particleboard variants.

	PB variants of 500 and $650 \text{ kg/m}^3$			
	KP/KP	BP/KP	BP/BP	KP/BP
Surface layer	KP	BP	BP	KP
Core layer	KP	KP	BP	BP

Note: BP = beech particles, KP = kiri particles.

EN 323 (1993). Bending strength (modulus of rupture, MOR) and modulus of elasticity in bending (MOE) were determined according to EN 310 (1993). Internal bond strength was determined according to EN 319 (1993). Surface soundness was determined according to EN 311 (2002). The number of replicates used for the tests is given in the captions of the respective figures. All specimens were randomly selected within their variation group ( $500 \text{ kg/m}^3 \pm 5\%$ , respectively  $650 \text{ kg/m}^3 \pm 5\%$ ). All tests were performed using a universal testing machine (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Germany).

### Density profiles

Density profiles were recorded by means of the X-ray device DAX (Grecon, Alfeld, Germany) using a PB specimen size of  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . The scanning speed was set to 1 mm/s with a resolution of 0.02 mm. Each density profile consisted of approximately 800 individual measurements.

### Statistical analysis

Significant differences between group means for mechanical properties of the PB variants were determined using One-way ANOVA and Kruskal–Wallis test. Shapiro–Wilk test was performed to test for normal distribution. Levene’s test was used to test for homogeneity of variances. The multiple comparison test Tukey HSD was performed, in case of normal distribution and homogeneity of variances. Kruskal–Wallis test was performed if the criteria were not met ( $p$ -level of .05).

## Results and discussion

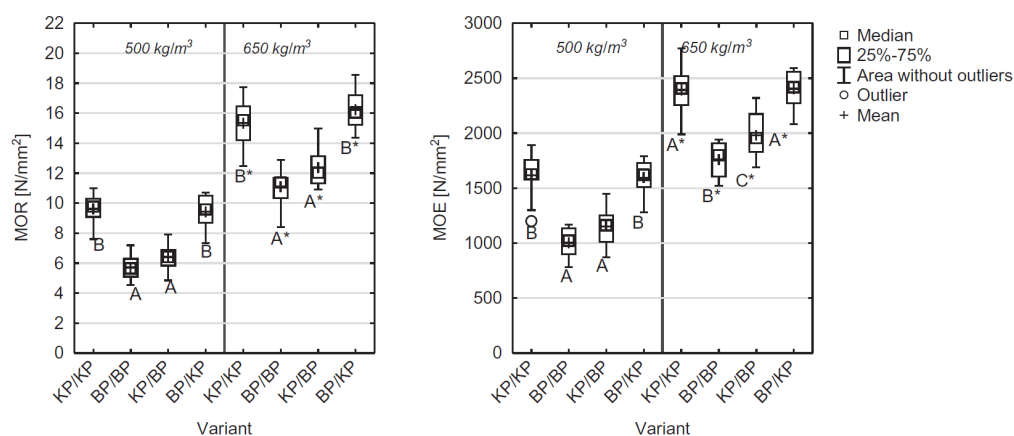
### Modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE)

All particleboard (PB) variants could be produced without technical problems. PB variants with kiri particles (KP) in the core layer displayed significantly higher values for MOR and MOE than those with beech particles (BP) for target densities of 500 and  $650 \text{ kg/m}^3$  (Figure 1). Thus, the core layer material has a significant influence on MOR and MOE for both PB densities. With regard to the same core layers, the surface layer did not influence MOR or MOE significantly, except for KP/BP at a density of  $650 \text{ kg/m}^3$ . Various aspects should be

**Table 1.** Composition of surface and core layers.

	Mesh size (mm)								
	Surface layer fractions				Core layer fractions				
Share (%)	<0.5	>0.5	>1.0	>1.6	<2.0	>0.4	>1.6	>3.15	>4.0
	19.1	42.3	35.7	2.0	0.3	26.6	23.7	39.2	10.5





**Figure 1.** MOR (left) and MOE (right) of four variants of PBs with target densities of 500 and 650 kg/m<sup>3</sup> ( $n = 12$ ). Different letters indicate significant differences between PB variants within their target density.

considered. Firstly, a higher density of the surface layers leads to higher MOR and MOE (Keylwerth 1958, Wong *et al.* 1999, Nemli and Demirel 2007). However, this is only correct in a limited sense for high-density wood species used in light PBs. Other influencing factors than a simple increase in raw material density may play a more important role. The second main aspect is that particles from a low-density raw material are compressed more than those of a higher density raw material to obtain PBs with the same target density. Thus, the compaction ratios of BP in PBs with densities of 500 and 650 kg/m<sup>3</sup> are much lower than those of KP (Table 3). Moslemi (1974) noted that the compaction ratio should be at least 1.3 in order to ensure a proper densification of the panel, whereas Kawai and Sasaki (1993) found a compaction ratio of 0.7 as lower practical limit of producing PB of different low- and high-density species. At both target densities, PBs with BP in the core layer showed a higher MOR and MOE with KP in the surface layer. The results of this study are in line with Vital *et al.* (1974), who found that boards pressed with a high-compression ratio showed higher MOR and MOE. The latter aspect is based on the fact that the higher compaction ratio of KP results in a more effective glue utilization and less voids in the PB (Nelis *et al.* 2018). PB made of KP form a much more voluminous mattress (due to the lower bulk density), which gets compressed to the same target thickness as PB based on BP. This compaction causes a higher contact area between the particles resulting in a more effective glue utilization and finally a higher MOR and MOE.

The MOR and MOE results of this study show that for PBs of the same target density, the more effective glue utilization due to higher compaction has a stronger influence on

bending strength than the density of the raw material alone. The percentage change (Table 4) from 500 to 650 kg/m<sup>3</sup> was higher for BP than for KP in the same core layer. This indicates that at higher target densities the density of the raw material has a higher influence than the better gluing due to compaction.

#### Internal bond strength (IB)

All 650 kg/m<sup>3</sup> PB variants displayed a significantly higher IB than corresponding 500 kg/m<sup>3</sup> variants (Figure 2). The results are in line with Plath (1963), Vital *et al.* (1974), Wong *et al.* (1999), Shalbafan *et al.* (2016), who showed that IB increases with increasing PB density. Regarding the target density of 500 kg/m<sup>3</sup>, KP/KP showed a significantly higher IB than BP/KP and no significant difference was observed between BP/BP and KP/BP. PB with the high-density wood species in the core layer exhibited lower IB results although the density profiles indicated that their mean density in the core layer was higher (Figure 4), which can be attributed to the higher compaction ratio and the corresponding more effective glue utilization of KP. By implication, more voids existed between the BP in the core layer (Nelis *et al.* 2018). For both target densities, KP in the surface layer led to a slightly higher IB. With regard to the target density of 650 kg/m<sup>3</sup>, no significant difference was found between KP/KP and BP/KP, but IB of BP/BP and KP/BP was significantly different.

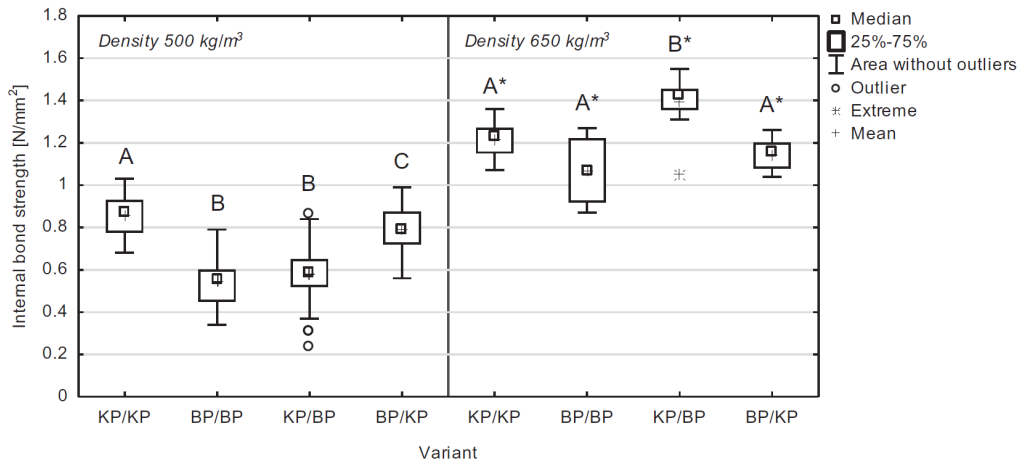
It is assumed that at a target density of 500 kg/m<sup>3</sup> the glue effect due to stronger compaction of KP causes higher IB. At a

**Table 3.** Compaction ratios of beech (698 kg/m<sup>3</sup>) and kiri (276 kg/m<sup>3</sup>) at 500 and 650 kg/m<sup>3</sup>.

	Density of PB variants (kg/m <sup>3</sup> )	
	500	650
Beech	500/698 = 0.7	650/698 = 0.9
Kiri	500/276 = 1.8	650/276 = 2.4

**Table 4.** Percentage change (%) of modulus of rupture (MOR), surface soundness (SUS) and internal bond strength (IB) from target density 500 to 650 kg/m<sup>3</sup>.

	Change from 500 to 650 kg/m <sup>3</sup> in (%)		
	MOR	SUS	IB
KP/KP	59.5	14.0	42.4
KP/BP	92.5	73.2	139.7
BP/KP	72.5	42.0	44.3
BP/BP	85.0	97.5	101.9



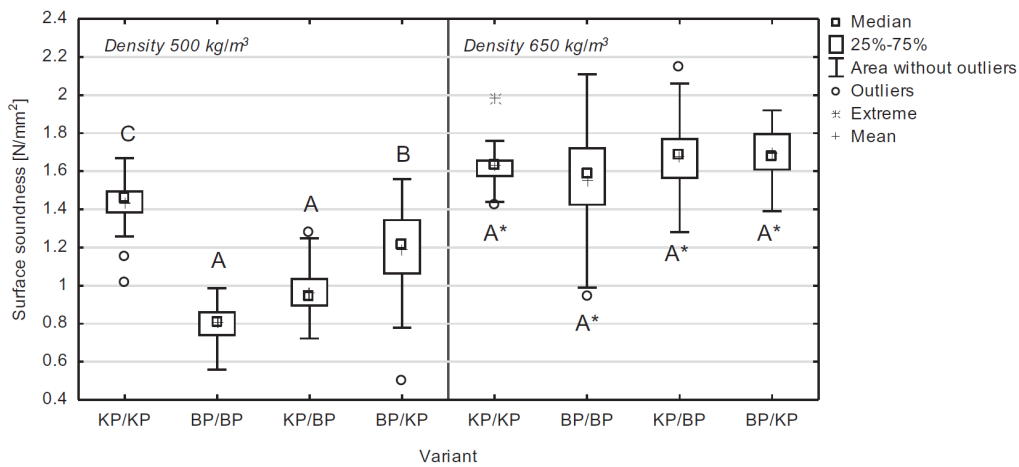
**Figure 2.** Internal bond strength of four variants of PBs with target densities of 500 (left) and 650 kg/m<sup>3</sup> (right). *N* varied between the variants (for 500 kg/m<sup>3</sup>: KP/KP = 72, BP/BP = 50, KP/BP = 61, BP/KP = 60; for 650 kg/m<sup>3</sup>: KP/KP = 15, BP/BP = 9, KP/BP = 12, BP/KP = 14). Different letters indicate significant differences between PB variants within their target density.

target density of 650 kg/m<sup>3</sup>, however, the glue effect and density effect apparently offset one another. The percentage change from 500 to 650 kg/m<sup>3</sup> (Table 4) of PB with BP in the core layer was double to almost triple as high as that of PB with KP in the core layer. This clearly shows the changing influence of the two effects: at 500 kg/m<sup>3</sup> the effect of better gluing due to higher compaction has a higher influence on IB, while at 650 kg/m<sup>3</sup> the higher density of BP becomes more influential.

**Surface soundness (SUS)**

SUS according to EN 311 (2002) is valued as an indicator for binding strength between the surface layer and core layer as the specimen is forced to break within the transition zone between the layers due to the special setup. All

650 kg/m<sup>3</sup> PB variants showed a significantly higher SUS than corresponding 500 kg/m<sup>3</sup> variants (Figure 3). Regarding the target density of 500 kg/m<sup>3</sup>, KP/KP exhibited a significantly higher SUS than BP/KP. No significant difference was observed between the variants BP/BP and KP/BP. For the target density of 650 kg/m<sup>3</sup>, the variants did not display significant differences. PB with BP in the core layer displayed a much higher percentage change of the same variants from 500 to 650 kg<sup>-3</sup> than those with KP (Table 4). The results show a similar pattern as for IB, which can be attributed to the same effects, although the failure mainly occurred mostly in the area between the surface and the core layer. At a target density of 500 kg/m<sup>3</sup> the glue effect (compaction) has a higher impact on the results than the density effect, and at a target density of 650 kg/m<sup>3</sup> the glue effect and density effect offset one another.



**Figure 3.** Surface soundness of four variants of PBs with target densities of 500 (left) and 650 kg/m<sup>3</sup> (right). *N* varied between the variants (for 500 kg/m<sup>3</sup>: KP/KP = 39, BP/BP = 27, KP/BP = 30, BP/KP = 30; for 650 kg/m<sup>3</sup>: KP/KP = 22, BP/BP = 24, KP/BP = 24, BP/KP = 24). Different letters indicate significant differences between PB variants within their target density.

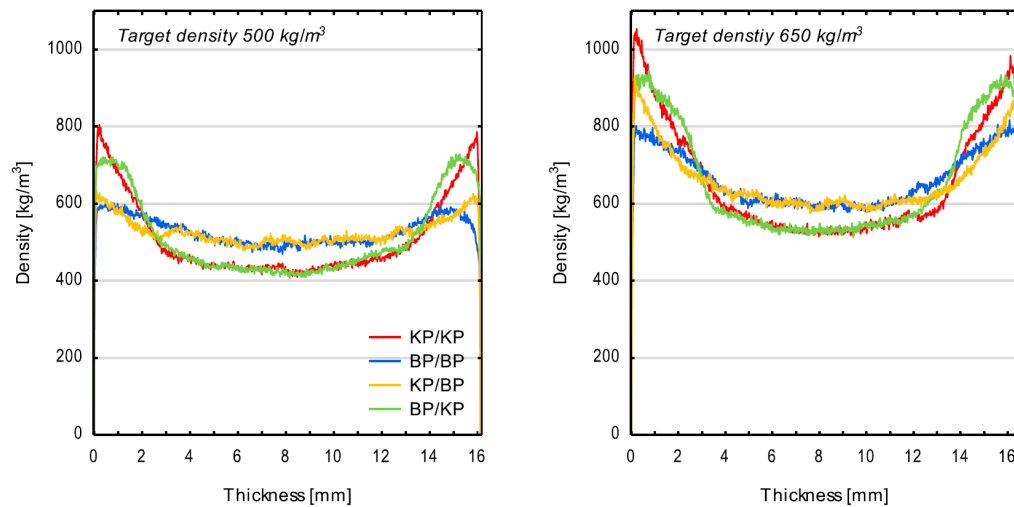


Figure 4. Exemplary density profiles of four variants of PBs with target densities of 500 (left) and 650 kg/m<sup>3</sup> (right).

### Density profile

Both for PB of 500 kg/m<sup>3</sup> and for those of 650 kg/m<sup>3</sup>, all vertical density profiles of the four variants resemble a “U-shape” (Figure 4), which is reported to be formed by conventional hot-pressing (Wong *et al.* 1999). PB with KP in the core layer exhibited higher density maxima in the surface layers and lower density minima in the core layers than PB with BP in the core layer, i.e. the former are more U-shaped than the latter. PB with KP in the surface layer displayed a linear to slightly concave descent towards the core layer, while BP caused a convex descent of the surface layer.

Considering MOR results at target density 500 and 650 kg/m<sup>3</sup>, the differently shaped surface layers of KP and BP did not induce a significant difference in MOR of PB with the same core layers. The density effect and the compaction effect appear to offset one another. Lower MOR and MOE of PB with BP in the core layer might be attributed to a higher density throughout the whole core layer and consequently lower density maxima in the surface layer. PB with KP in the core layer, however, exhibit a density profile which resembles the shape of an I-beam. The planking of the high-density surface enhances the bending strength (Keylwerth 1958). However, the effect of gluing (compaction ratio) also contributes to the MOR and partly explains the higher values of PBs with KP in the core layer.

Considering IB results at target density 500 kg/m<sup>3</sup>, BP in the core layer exhibited a higher mean density (Figure 4), but the IB was lower than with KP in the core layer. Thus, the glue effect due to higher compaction predominates over the density effect. The density profiles at 650 kg/m<sup>3</sup> show principally the same shape as at 500 kg/m<sup>3</sup> target density, but the IB at 650 kg/m<sup>3</sup> was not significantly different between KP/KP and BP/BP. This indicates that the compaction effect and the density effect equalized each other. Many studies (Plath and Schnitzler 1974, Kruse *et al.* 1996, Wong *et al.* 1999) showed that IB generally depended on the density profile. Nemli and Demirel (2007) found that a higher core density results in

higher IB. This was also observed for the same variants at different target densities in this study, but not for different wood particle types at the same target densities. Schulte and Frühwald (1996), however, reported that there is no general correlation between mean density or minimum density of a density profile and the IB.

A very similar trend was observed for surface soundness (SUS). Considering target density of 500 kg/m<sup>3</sup>, KP/KP and BP/KP, as well as KP/BP and BP/BP showed similar density ranges in the transition zones of surface and core layer at around 3.2 and 12.8 mm. However, KP/KP led to significantly higher SUS than BP/KP. As for IB, this can be attributed to the more effective glue utilization due to stronger compaction of KP in the surface layer and therefore, improved bonding in the transition zone between the layers. At target density of 650 kg/m<sup>3</sup>, SUS for all variants does not differ significantly. Thus, the two effects seem to have an equal weight on effecting the SUS. Grigoriou (1981) reported that a high density in the surface layer does not consequently lead to a high SUS and, therefore, he did not consider the surface layer density as a crucial factor for SUS. The density profile is effected by many complex interactions of various production parameters (Kruse *et al.* 1996). The results of this study show that both the raw material density and the compaction (more effective glue utilization) play an important role in interpreting density profiles. Their contribution to strength changes with changing target density of the PB. The contribution of a stronger compaction of the particles to strength decreases with an increasing target density of the PB.

### Conclusion

The aim of this study was to determine, how wood species with different densities in surface and core layer influence mechanical properties of PBs. Producing PBs with the same target densities, but using raw materials of different densities,

consequently leads to different compaction ratios. To interpret the results of this study, two interacting effects need to be considered: the different densities of the raw materials and the different level of effectiveness with regard to glue utilization. For target density  $500 \text{ kg/m}^3$ , the more effective glue utilization of the lower density raw material had a greater influence on strength properties than the higher density of the raw material. With increasing the target density from  $500$  to  $650 \text{ kg/m}^3$ , a shift of the dominating effect took place from the compaction effect (more effective glue utilization) towards the density effect of the raw material. The low-density raw material shows minor percentage changes between these two effects than the high-density raw material, when increasing the target density from  $500$  to  $650 \text{ kg/m}^3$ . The compaction ratio and therefore the efficiency of glue utilization are crucial factors and should always be considered interpreting results of density profiles.

### Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

### Funding

This work was supported by the AiF Projekt GmbH [grant number KF2454610].

### References

- Akrami, A., Barbu, M. C. and Fruehwald, A. (2014) Characterization of properties of oriented strand boards from beech and poplar. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 393–398.
- Burnett, M. P. and Kharazipour, A. (2018) Mechanical behaviour of a light-weight, three-layered sandwich panel based on the raw material maize. *Holzforschung*, 72, 65–70.
- Clad, W. (1982) Lowering the density of particleboard – A literature survey. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 40, 387–393.
- Clad, W. and Pommer, E. H. (1980) Particleboard from kiri (*Paulownia tomentosa*, Fam. Scrophulariaceae). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 38, 385–391.
- EN 310 (1993) *Wood-Based Panels – Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength* (Brussels, Belgium).
- EN 311 (2002) *Wood-Based Panels – Surface Soundness – Test Method* (Berlin, Germany).
- EN 319 (1993) *Particleboards and Fibreboards – Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board* (Brussels, Belgium).
- EN 323 (1993) *Wood-Based Panels – Determination of Density* (Brussels, Belgium).
- EN 326-1 (1994) *Wood-Based Panels – Sampling, Cutting and Inspection – Part 1 – Sampling and Cutting of Test Pieces and Expression of Test Results* (Brussels, Belgium).
- EPF (2016) European Panel Federation: Economic review of the wood-based panels industry in 2015 at EPF's Annual General Meeting in Venice on 7th and 8th July 2016. Accessed 14 Mai 2019, available at: [https://www.fordaq.com/news/EPF\\_panel\\_industry\\_wood\\_48214.html](https://www.fordaq.com/news/EPF_panel_industry_wood_48214.html)
- Grigoriou, A. (1981) Influence of different wood species on the properties of three layer particleboard and their surface layers. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 39, 97–105.
- Kawai, S. and Sasaki, H. (1993) Low-density particleboard. In N. Shiraishi, H. Kajita, and M. Norimoto (eds.), *Recent Research on Wood and Wood-Based Materials – Current Japanese Materials Research* (London: Elsevier Applied Science), Vol. 11, pp. 36–41.
- Kehr, E. and Jensen, U. (1975) On the development of the properties of particleboards for furniture production [In German: Zur Entwicklung der Eigenschaften von Spanplatten für den Möbelbau]. *Holztechnologie*, 16, 161–170.
- Keylwerth, R. (1958) On the mechanics of the multilayer particle board. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 16, 419–430.
- Klauditz, W. and Stegmann, G. (1958) About the suitability of poplar wood for the production of particleboards [In German: Über die Eignung von Pappelholz zur Herstellung von Holzspanplatten]. *Holzforschung*, 11, 174–179.
- Kollmann, F. (1951) Physik des Holzes. In F. Kollmann (ed.), *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (Berlin: Springer-Verlag), 2nd ed., pp. 327–362.
- Kruse, K., Bröker, F. W. and Frühwald, A. (1996) Interrelation between internal bond, density distribution and ultrasonic velocity of particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54, 295–300.
- Lengyel, K., Barbu, M. C., Campean, M., Badin, N. and Bedeleian, B. (2017) Improving properties of particleboards with reduced density. *BioResources*, 13, 1289–1302.
- Monteiro, S., Martins, J., Magalhães, F. D. and Carvalho, L. (2016) Low density wood-based particleboards bonded with foamable sour cassava starch: preliminary studies. *Polymers*, 8, 1–11.
- Moslemi, A. A. (1974) *Particleboard: Materials*. Vol. 1 (Carbondale: Southern Illinois University Press).
- Nelis, P. A., Michaelis, F., Krause, K. C. and Mai, C. (2018) Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): Can it improve the performance of particleboards? *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 445–453.
- Nemli, G. and Demirel, S. (2007) Relationship between the density profile and the technological properties of the particleboard composite. *Journal of Composite Materials*, 41, 1793–1802.
- Plath, E. (1963) Influence of density on the properties of wood-base materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 21, 104–108.
- Plath, E. and Schnitzler, E. (1974) The density profile, a criterion for evaluating particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 32, 443–449.
- Schulte, M. and Frühwald, A. (1996) Some investigations concerning density profile, internal bond and relating failure position of particleboard. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 54, 289–294.
- Shalbafan, A., Tackmann, O. and Welling, J. (2016) Using of expandable fillers to produce low density particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74, 15–22.
- Vital, B. R., Lehmann, W. F. and Boone, R. S. (1974) How species and board densities affect properties of Exotic hardwood particleboards. *Forest Products Journal*, 24(12), 37–45.
- Wong, E. D., Zhang, M., Wang, Q. and Kawai, S. (1999) Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Science and Technology*, 33, 327–340.
- Wyss, O. (1981) The history of particleboard patents. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 39, 399–404.



### 3.4 Publikation 4

#### Effects caused by admixing of different amounts of kiri particles to low-density spruce particleboards at different adhesive contents

Autoren: Philipp A. Nelis, Carsten Mai  
 Journal: Wood Material Science & Engineering  
 Jahr: Eingereicht beim Verlag am 09.08.20  
 DOI: Noch nicht vergeben

#### Autorenschaft nach Clement (2014)

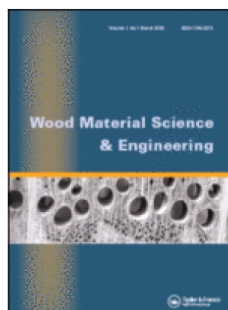
Autoren	Ideen (30 %)	Arbeit (30 %)	Schreiben (30 %)	Verwaltung (10 %)	Beitrag / Verantwortung
P. A. Nelis	70 %	100 %	70 %	40 %	74 %
C. Mai	30 %	0 %	30 %	60 %	26 %

**Ideen:** Konzeption der Untersuchung / Versuchsplanung / Interpretation der Daten

**Arbeit:** Durchführung des Versuchs / Datenaufnahme und -analyse

**Schreiben:** Entwurf des Artikels / kritische, inhaltliche Überarbeitung / Begutachtung der Endfassung

**Verwaltung:** Erschließung von Ressourcen und Gewährleistung der wissenschaftlichen Integrität vor, während und nach der Publikation



**Effects caused by admixing of different amounts of kiri particles to low-density spruce particleboards at different adhesive contents**

Journal:	<i>Wood Material Science and Engineering</i>
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Original Paper
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Nelis, Philipp; University of Gottingen Mai, Carsten; Burckhardt Institute, University of Göttingen, Wood Biology and Wood Products
Keywords:	Kiri, Paulownia, particleboard, mechanical strength, modulus of rupture, internal bond strength

SCHOLARONE™  
Manuscripts

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

**Short communication**

Philipp Alexander Nelis and Carsten Mai\*

*Department of Wood Biology and Wood Products, University of Goettingen, Göttingen, Germany;*

\* Corresponding author: Büsgenweg 4, 37077 Göttingen, Germany | [cmai@gwdg.de](mailto:cmai@gwdg.de)

**Acknowledgement**

This work was supported by the AiF Projekt GmbH under Grant KF2454610WZ4.



## Effects caused by admixing of different amounts of kiri particles to low-density spruce particleboards at different adhesive contents

Particleboards were produced from mixtures of Norway spruce and kiri particles (KP). Admixture of KP to spruce particles enhanced the strength but the higher the adhesive content (AC), the lower was the percentage increase of internal bond strength and modulus of rupture within the AC groups due to addition of KP.

Keywords: Kiri; Paulownia; particleboard; mechanical strength; modulus of rupture; internal bond strength; low-density

### Introduction

Particleboards (PB) made of low-density wood species such as *Paulownia* ssp. resulted in higher strength properties than those of high-density species at the same target panel density. This is attributed to a more effective adhesive utilization when using low-density species due to a higher compaction ratio (Nelis et al. 2018; Nelis and Mai 2019a, b). *Paulownia* has recently been acknowledged as an excellent plantation tree in many European countries such as Germany, Italy and Spain, but the availability of the wood species on the European market is still very limited. A stronger compaction of particles enhances the efficacy of adhesive utilization. Admixing of KP to other industrial particles might reduce the proportion of adhesive in the panels, which is needed to meet the standard threshold values in terms of mechanical strength. Lower amounts of adhesive reduce costs and the environmental impact. In this study, we assessed, if the adhesive proportion can be reduced through admixing of various proportions of KP to a low-density PB of spruce particles without losses in mechanical strengths.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## Material and methods

### Material

Branches and stems with diameters of 5 – 15 cm of kiri trees (*Paulownia tomentosa* x *fortunei*), clone Nordmax 21<sup>®</sup>, grown on plantations in Germany, were provided by WeGrow GmbH (Tönisvorst, Germany). Two spruce (*Picea abies* L.) stems with diameters between 50 and 60 cm and a length of 4 m were cut to pieces of 1 m length, and manually split. Kiri wood showed a density of approximately 280 kg m<sup>-3</sup> and spruce wood of approximately 450 kg m<sup>-3</sup>. The spruce and kiri material was debarked manually and chopped into chips with a chopper (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). These chips were further processed to particles in a knife ring flaker (Modul Systeme Engineering GmbH, Laufen, Germany). Screening of the spruce particles (SP) and the kiri particles (KP) was carried out with a tumbler screener (Allgaier-Process Technology GmbH, Uhingen, Germany) with an upper mesh size of 4 x 4 mm and a lower mesh size of 1.3 x 1.3 mm. All KP and SP were dried to < 5% moisture content in a timber dryer (HB Drying Systems, Almelo, Netherlands).

### Panel and specimen manufacturing

Five panel variants (Table 1) were produced with a target density of 500 kg m<sup>-3</sup> at three adhesive contents. The particles were resinated with the urea-formaldehyde (UF) resin Kauramin K350 (BASF AG, Ludwigshafen, Germany) with a solid content of 66.9% in a rotating drum blender. The proportion of dry resin amounted to 4, 8, or 12% of the dry mass of particles ( $\text{wt}_{\text{dry content resin}} / \text{wt}_{\text{dry particles}}$ ). A 33% solution of ammonium sulphate (AppliChem GmbH, Darmstadt, Germany) with a load of 2% ( $\text{wt}_{\text{dry content solution}} / \text{wt}_{\text{dry content resin}}$ ) was added to the resin as a hardener. The resinated particles were formed into a mat (450 x 450 mm<sup>2</sup>), cold pre-pressed and subsequently hot-pressed at 200 °C and 6.81 N mm<sup>-2</sup> for 12 s mm<sup>-1</sup> using metal bars as stops to

1  
2  
3 ensure a target thickness of 17 mm. Three PB were produced per each of the five  
4  
5 variants and corresponding adhesive content. After the hot-pressing process, the PB  
6  
7 were cooled at room temperature, sanded to a thickness of 16 mm and cut to dimensions  
8  
9 of 390 x 390 mm<sup>2</sup>. Then, the PB were cut into various specimens according to a cutting  
10  
11 plan following EN 326-1 (1994).  
12  
13

### 14 15 16 ***Mechanical properties***

17 All specimens were conditioned to constant mass at 20 °C and 65% relative humidity.  
18  
19 Density of all specimens was determined according to EN 323 (1993); bending strength  
20  
21 (modulus of rupture, MOR) according to EN 310 (1993) (4 specimens per board,  
22  
23 n = 12); internal bond strength (IB) according to EN 319 (1993) (5 specimen per board,  
24  
25 n = 15).  
26  
27  
28  
29

### 30 31 ***Percentage increase (PI) and scaled relative percentage increase (SRPI)***

32 Percentage increase (PI) in internal bond strength (IB) or modulus of rupture (MOR) is  
33  
34 defined as follows:  
35

$$36 \text{ Percentage increase (PI) [\%]} = \left( \frac{c_2 - c_1}{c_1} \right) * 100$$

37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  $c_1$  = mean value of SP100 (of IB or MOR)

45  
46  $c_2$  = mean values of all other variants (of IB or MOR)  
47  
48

49 Scaled relative percentage increase (SRPI) describes the relative increase per 10%  
50  
51 addition of KP in IB and MOR and is defined as follows:  
52  
53

$$54 \text{ Scaled relative percentage increase (SRPI) [\%]} = \frac{\left( \frac{a_{n+1} - a_n}{a_n} \right)}{KPF} * 100$$

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

$a_n$  = mean value of variant (of IB or MOR)

$a_{n+1}$  = mean value (of IB or MOR) of the following variant within the same adhesive content (AC) group

KPF = Kiri Proportion Factor based on the amount of KP added (SP100 to KP10 = 1, KP10 to KP30 = 2, KP30 to KP50 = 2, KP50 to KP100 = 5)

### Results and discussion

Production of all PB variants (Table 1) proceeded without technical problems.

Regarding IB, panels solely made of KP (KP100) displayed the highest IB and those of 100% spruce particles (SP100) the lowest values for all adhesive contents (AC) tested (Figure 1). IB values of these variants were significantly different at all AC. IB increased with increasing proportions of KP in the corresponding variants at all AC.

Comparing the same variants at different AC indicates that higher AC induced higher IB. At 4% adhesive content (AC4), increasing the proportion of KP led to the highest percentage increase (PI) throughout all variants compared to AC8 and AC12 (Table 2). Also, the scaled relative percentage increase (SRPI) was highest from 30% (KP30) to 50% (KP50) kiri particles. This shows that the IB-enhancing effect of KP is increasing up to an admixed proportion of 50% of KP at the lowest AC. With respect to the same variants, PI decreased with increasing AC for all cases except for KP30 from AC8 to AC12. For KP100, IB almost doubled from AC4 to AC8, but the increase from AC8 to AC12 was much smaller. KP100 at AC8 exhibited a higher IB than SP100 at AC12.

The difference in IB from AC8 to AC12 is greater for SP100 than for KP100. SRPI indicated that at AC8 and AC12 the greatest effect of adding KP to a regular spruce PB resulted from adding the first 10%. The flattening logarithmically fitted curve in Figure 1 displays that this effect constantly decreased further on.

The MOR results presented similar trends like those of IB. Here, KP100 also exhibited the highest values and SP100 the lowest for all AC (Figure 2). Regarding AC4,

1  
2  
3 admixing of KP caused the greatest PI. While the increase in MOR of the variants from  
4  
5 AC4 to AC8 was high, the increase between AC8 and AC12 was more moderate. In  
6  
7 addition, KP100 at AC4 showed similar MOR as SP100 at AC8. While the MOR of  
8  
9 KP10 at AC4 was significantly different from those of SP100 and KP100, no significant  
10  
11 differences were found between those of KP10, KP30 and KP50. SRPI indicated that at  
12  
13 all AC the highest effect of adding KP to a regular spruce PB resulted from adding the  
14  
15 first 10%, especially at AC4, where the increase from SP100 to KP10 was almost five  
16  
17 times higher than the following (Table 2). Regarding AC8, a constant increase in MOR  
18  
19 happened with increasing proportion of KP, although significant differences were found  
20  
21 only between KP100 and the other variants. KP100 at AC8 exhibited higher MOR than  
22  
23 SP100 at AC12. The lowest PI occurred at AC12 (Table 2). The lack of significant  
24  
25 differences for SP100, KP10, KP30 and KP50, as well as SRPI show that admixing  
26  
27 small amounts of KP has a minor effect on MOR with regard to AC8 and AC12. Here, a  
28  
29 significant difference arose only between SP100 and KP100. Still, the trend of higher  
30  
31 MOR due to addition of KP to regular spruce PB continued. KP50 exhibited lower  
32  
33 values than KP30. It is expected that an error occurred during the testing bending  
34  
35 strength of KP50.  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43

#### 44 **Conclusion**

45  
46 Admixing of KP to SP leads to an increase of IB and MOR at all adhesive contents  
47  
48 (AC) tested. The greatest percentage increase (PI) in mechanical strength is  
49  
50 accomplished at the lowest AC. The higher the AC, the lower is the PI caused by the  
51  
52 admixture within the AC groups. AC can be reduced by up to half without reducing  
53  
54 MOR and about one third without reducing IB, when using 100% KP instead of 100%  
55  
56 SP. Admixing of only small amounts of KP induces the largest relative effects on  
57  
58 mechanical strengths (except for IB at AC4). This result identifies kiri wood as potential  
59  
60

1  
2  
3 raw material, particularly because the availability of kiri remains limited on the market  
4  
5

#### 6 7 **Acknowledgement**

8  
9 This work was supported by the AiF Projekt GmbH under Grant KF2454610WZ4.  
10  
11

#### 12 13 **References**

14  
15 Nelis PA, Mai C (2019a) Improved strength properties of three-layered particleboards  
16  
17 with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.). Eur J Wood  
18  
19 Wood Prod 77:761–769. DOI: 10.1007/s00107-019-01442-7  
20  
21

22  
23  
24 Nelis PA, Mai C (2019b) The influence of low-density (*Paulownia* spp.) and high-  
25  
26 density (*Fagus sylvatica* L.) wood species on various characteristics of light and  
27  
28 medium-density three-layered particleboards. Wood Mater Sci Eng. DOI:  
29  
30 10.1080/17480272.2019.1659850  
31  
32

33  
34  
35 Nelis PA, Michaelis F, Krause KC, Mai C (2018) Kiri wood (*Paulownia tomentosa*):  
36  
37 can it improve the performance of particleboards? Eur J Wood Wood Prod 76:445–453.  
38  
39 DOI: 10.1007/s00107-017-1222-7  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## **List of tables**

Table 1: Denotation and proportions of kiri particles (KP) and spruce particles (SP) of PB variants .....2

Table 2: Percentage increase (PI) related to the reference SP100 and scaled rel. percentage increase (SRPI) in internal bond strength (IB) and modulus of rupture (MOR) of the variants within the AC group (4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12)) .....3

## **List of figures**

Figure 1: Boxplots of internal bond strength (IB) of 5 variants of PB at adhesive contents (AC) of 4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12) with a logarithmically fitted curve per AC group. Different letters indicate significant differences between PB variants within their AC group .....4

Figure 2: Boxplots of modulus of rupture of 5 variants of PB at adhesive contents (AC) of 4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12) with a logarithmically fitted curve per AC group. Different letters indicate significant differences between PB variants within their AC group .....5

Table 1: Denotation and proportions of kiri particles (KP) and spruce particles (SP) of PB variants

	Denotations of variants				
	SP100	KP10	KP30	KP50	KP100
Proportion KP [%]	0	10	30	50	100
Proportion SP [%]	100	90	70	50	0

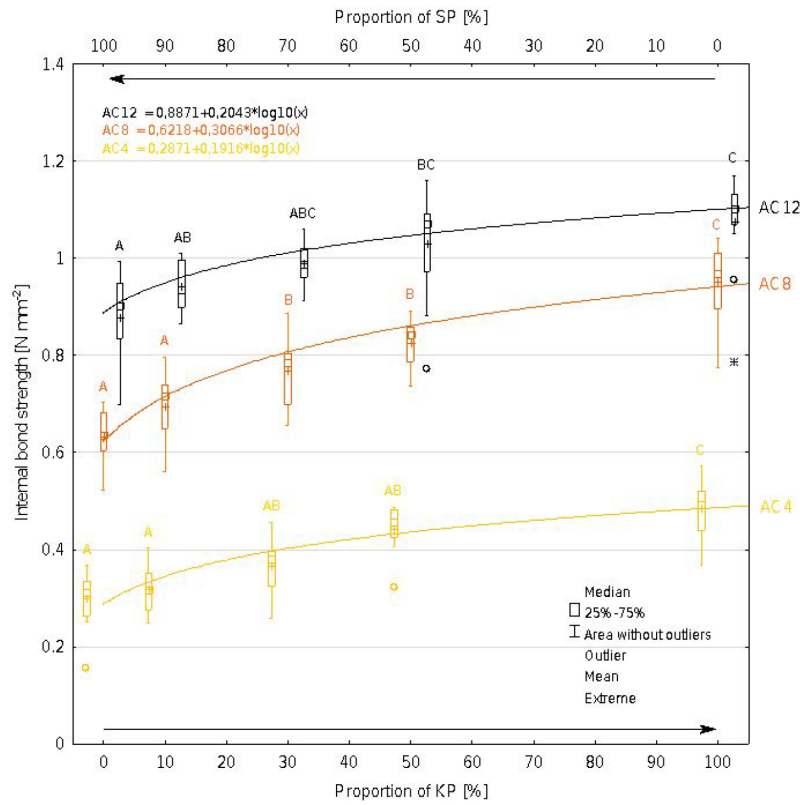
For Peer Review Only

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60



Table 2: Percentage increase (PI) related to the reference SP100 and scaled rel. percentage increase (SRPI) in internal bond strength (IB) and modulus of rupture (MOR) of the variants within the AC group (4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12))

PI [%]		SRPI [%]					
Internal bond strength							
	AC4	AC8	AC12		AC4	AC8	AC12
SP100	x	x	x	SP100 to KP10	6.8	9.9	7.3
KP10	10.4	7.7	5.7	KP10 to KP30	7.2	5.2	2.5
KP30	29.3	8.8	10.9	KP30 to KP50	10.5	3.8	2.1
KP50	48.8	17.0	15.5	KP50 to KP100	1.9	3	0.9
KP100	62.0	35.4	17.0				
Modulus of rupture							
	AC4	AC8	AC12		AC4	AC8	AC12
SP100	x	x	x	SP100 to KP10	19	6.9	3.2
KP10	16.2	6.9	3.3	KP10 to KP30	4	1.2	2.6
KP30	25.6	9.5	8.6	KP30 to KP50	-0.9	-0.1	-1.5
KP50	23.4	9.3	5.4	KP50 to KP100	3.3	2.8	2.3
KP100	44.0	24.5	17.7				



39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

Figure 1: Boxplots of internal bond strength (IB) of 5 variants of PB at adhesive contents (AC) of 4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12) with a logarithmically fitted curve per AC group. Different letters indicate significant differences between PB variants within their AC group

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

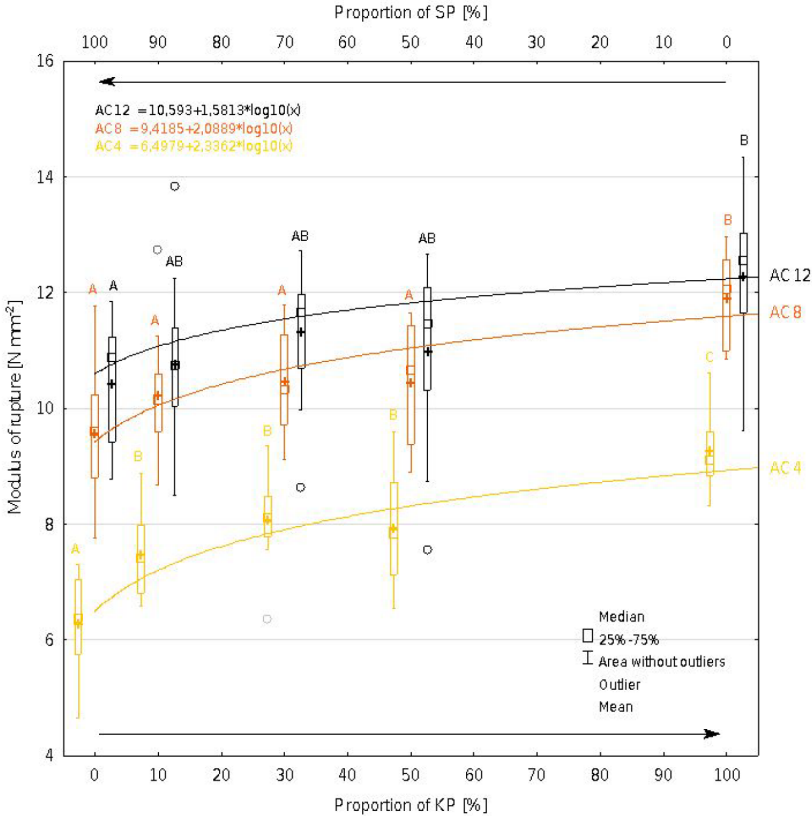


Figure 2: Boxplots of modulus of rupture of 5 variants of PB at adhesive contents (AC) of 4% (AC4), 8% (AC8) and 12% (AC12) with a logarithmically fitted curve per AC group. Different letters indicate significant differences between PB variants within their AC group

## 3.5 Publikation 5

### Comparison of blockboards with core layers made of kiri (*Paulownia* spp.) and of spruce (*Picea abies*) regarding mechanical properties

Autoren: Philipp A. Nelis, Olaf Henke, Carsten Mai  
 Journal: European Journal of Wood and Wood Products 77, 323-326  
 Jahr: 2019  
 DOI: 10.1007/S00107-019-01381-3

#### Autorenschaft nach Clement (2014)

Autoren	Ideen (30 %)	Arbeit (30 %)	Schreiben (30 %)	Verwaltung (10 %)	Beitrag / Verantwortung
P. A. Nelis	30 %	40 %	70 %	20 %	<b>44 %</b>
O. Henke	30 %	60 %	0 %	20 %	<b>29 %</b>
C. Mai	40 %	0 %	30 %	60 %	<b>27 %</b>

**Ideen:** Konzeption der Untersuchung / Versuchsplanung / Interpretation der Daten

**Arbeit:** Durchführung des Versuchs / Datenaufnahme und -analyse

**Schreiben:** Entwurf des Artikels / kritische, inhaltliche Überarbeitung / Begutachtung der Endfassung

**Verwaltung:** Erschließung von Ressourcen und Gewährleistung der wissenschaftlichen Integrität vor, während und nach der Publikation



# Comparison of blockboards with core layers made of kiri (*Paulownia* spp.) and of spruce (*Picea abies*) regarding mechanical properties

Philipp A. Nelis<sup>1</sup> · Olaf Henke<sup>1</sup> · Carsten Mai<sup>1</sup> Received: 13 November 2018 / Published online: 1 February 2019  
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

## Abstract

In this study, kiri wood (*Paulownia* spp.) is assessed as potential core layer material for blockboards. Blockboards with core layers made of kiri and spruce (*Picea abies*) were produced using *Anthocephalus cadamba* as crossband veneer and beech (*Fagus sylvatica*) as face veneer. With spruce as core layer material, higher values for bending strength and modulus of elasticity, tested in grain direction, and screw withdrawal resistance were obtained. In return, blockboards with kiri as core layer material were 31% lighter and showed a more homogeneous core layer material with regard to density.

## 1 Introduction

The aim of producing blockboards is to create a building material that is fully made of wood but exhibits enhanced material properties, like higher stability against deformation and reduced weight. With respect to mass production, the blockboard has already been replaced many years ago by other wood-based panels due to high labour costs, but it can still be found in handcrafted furniture or furniture for special purposes. The reduced weight makes it particularly interesting for purposes, where low weight is considered a crucial factor such as caravanning, trade fair construction, automotive industries and interior constructions for shipbuilding (Marutzky et al. 2008). *Paulownia* is a very fast-growing species, which is cultivated on plantations. In China, it has already been cultivated for over 2000 years (Barton et al. 2007). For several years, a growing interest in this species can be noted also in Europe, as many plantations have been cultivated throughout Europe with the purpose of timber production. Thinning on a regular basis is crucial to obtain high-quality timber (Rao 1986), which makes low-density wood assortment available in high quantities. The assortment is still difficult to market, because of uncertainties due to a lack of knowledge regarding the material properties. Nelis et al. (2018) stated that kiri wood is a very interesting

raw material for the wood-based panel industry and thus, it could also be of interest for the blockboard production due to its low density. The low hardness of this species should not be a problem, when using a face veneer of high density and considerably higher hardness such as beech wood. Kiri could replace other light species from exotic origins, which could increase the consumers acceptance and also play its part in the conservation of the tropical rainforests (Marutzky et al. 2008).

## 2 Materials and methods

### 2.1 Material

For the production of the blockboards, single sticks with dimensions of 500 (L) × 20 (W) × 15 (H) mm<sup>3</sup> of *Paulownia* spp. (from Shaanxi province, China) and *Picea abies* were used as core layers. Each core layer consisted of 17 sticks. Veneers of 2 mm thickness from *Anthocephalus cadamba* served as crossband veneers and *Fagus sylvatica* veneers of 0.5 mm thickness as face veneers.

### 2.2 Panel and specimen manufacturing

Four variants of blockboards were produced. While crossband and face veneers were kept the same for all variants, two variants of core layer (PG and NG) were used for each species. For variant PG, the single sticks of the core layers were glued among each other and in a second step, they were glued onto the crossband veneer. The utilized glue was

✉ Carsten Mai  
cmai@gwdg.de

<sup>1</sup> Wood Biology and Wood Products, Burckhardt Institute, University of Goettingen, Büsgenweg 4, 37077 Göttingen, Germany

Jowacoll® 103.30 by Jowat SE. For variant NG, the single sticks were directly glued onto the crossband veneer without preceding pre-gluing. The further production parameters were kept the same for all variants. First, the core layers were glued onto the crossband veneers and then pressed in a hot press at 60 °C, 70 N mm<sup>-2</sup> and a pressing time of 15 min. After the pressing process, the boards were cooled to ambient temperature. Second, a uniform face veneer with dimensions of 600×500 mm<sup>2</sup> was put together from several face veneer strips with a width of 150 mm. The face veneers were then glued onto the crossband veneers at a 90° grain angle and pressed at 60 °C, 70 N mm<sup>-2</sup> and a pressing time of 15 min. After the pressing process, the blockboards were cooled down to ambient temperature and cut to dimensions of 560×500 mm<sup>2</sup>. Each blockboard was cut into seven specimens with dimensions of 500×50 mm<sup>2</sup> and five specimens with dimensions of 50×50 mm<sup>2</sup>.

**2.3 Mechanical properties**

All specimens were conditioned to constant mass at 20 °C and 65% RH. Density was determined according to EN 323 (1993); bending strength (modulus of rupture, MOR) and modulus of elasticity in bending (MOE) were tested with the core layer in longitudinal grain direction and perpendicular to grain according to EN 310 (1993). Screw withdrawal resistance (SWR) was assessed according to EN 320 (2011). The group “radltan” shows SWR perpendicular to grain,

“long” shows SWR with the screw orientation in grain direction (longitudinal) and “face” shows SWR perpendicular to grain and additionally effected by crossband and face veneer.

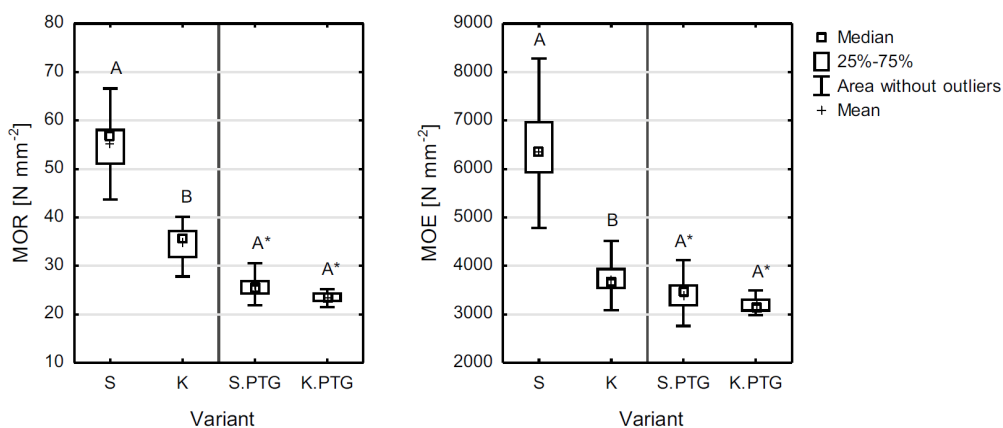
**3 Results and discussion**

All blockboards could be produced without any technical problems. The mean densities and the corresponding standard deviations of the blockboard variants differed significantly (Table 1). Blockboards containing spruce exhibited a 31% higher mean density with 54% higher standard deviation than those based on kiri. Blockboards with kiri as core layer showed a more homogeneous density. Statistical analysis revealed that variants PG and NG with the same core layer did not show significant differences with respect to density, bending strength and screw withdrawal resistance. Therefore, all results were distinguished only between the two species.

Boards containing spruce (S) showed significantly higher modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) than kiri (K), when tested in grain direction (Fig. 1). Respective boards of spruce (S.PTG) and kiri (K.PTG) tested perpendicular to grain revealed statistically insignificant results for MOR and MOE. While MOR results of spruce tested in grain direction were 37% higher than kiri, for MOR tested perpendicular to grain a 9% higher mean value of spruce was noted. This shows that for blockboards, bending strength tested perpendicular to grain is much less susceptible to changes in density than that tested in grain direction. Considering the generally low bending strength of wood when tested perpendicular to grain, the crossband veneer contributes significantly to the strength values. First, the crossband veneer is tested in grain direction and second, it has a high

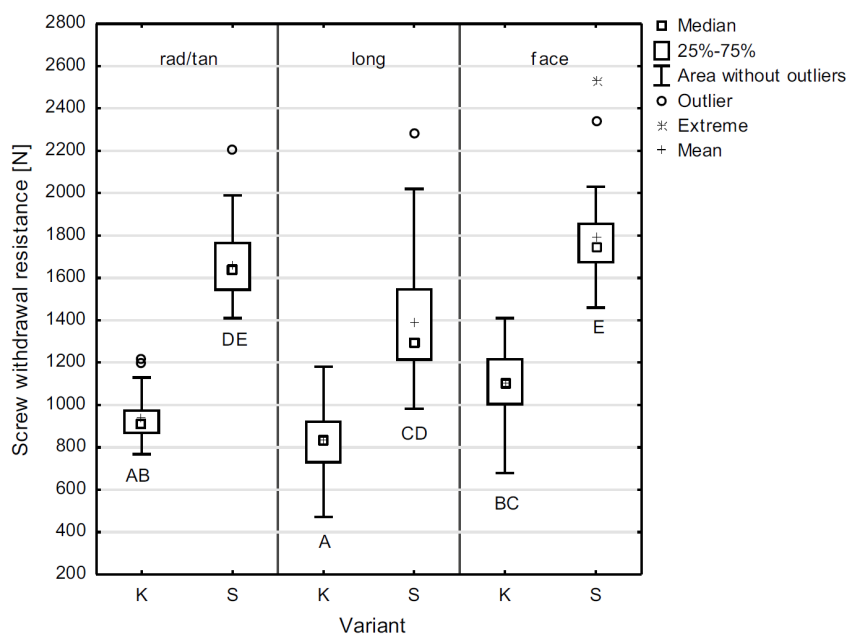
**Table 1** Mean densities ( $\bar{x}$ ) and standard deviations ( $\sigma$ ) of the blockboard variants with kiri and spruce as wood core layer

Variant	$\bar{x}$ (kg m <sup>-3</sup> )	$\sigma$ (kg m <sup>-3</sup> )
Kiri	297.1	10.5
Spruce	433.4	23.1



**Fig. 1** Bending strength (modulus of elasticity, MOR, left) and modulus of elasticity (MOE, right) of two variants, tested in grain direction (S, K) and perpendicular to grain (S.PTG, K.PTG)

**Fig. 2** Screw withdrawal resistance (SWR) of blockboards with kiri and spruce wood as core layer material. *Rad/tan* shows SWR perpendicular to grain, *long* shows SWR longitudinal with the grain and *face* shows SWR perpendicular to grain influenced by crossband and face veneer



influence because of the generally low bending strength tested perpendicular to grain. The respective specimens with the same core layer material did not show significant differences between variants with and without pre-gluing. This indicates the high influence of the crossband veneer on the bending strength perpendicular to grain. The much higher standard deviation for the density of the spruce is also reflected by MOR and MOE. According to DIN EN 636 (2015), blockboards with spruce as core layer would be ascribed to class F35/E60 (min. MOR of  $52 \text{ N mm}^{-2}$  / min. MOE of  $6300 \text{ N mm}^{-2}$ ) and with kiri as core layer to class F20/E40 (min. MOR of  $30 \text{ N mm}^{-2}$  / min. MOE of  $3600 \text{ N mm}^{-2}$ ).

Boards containing spruce showed about 40% higher screw withdrawal resistance (SWR) than those containing kiri for all screw locations (Fig. 2). These results confirm the strong correlation between density and SWR. The orientation “*long*” showed the lowest and “*face*” the highest mean density for both species. For kiri and spruce, statistical analysis revealed significant differences between “*face*” and “*long*”.

#### 4 Conclusion

The choice of the core layer wood species is crucial for bending strength and MOE, when tested in grain direction, and for screw withdrawal resistance. While spruce as core layer material caused higher bending strength, MOE and SWR, blockboards with kiri as core layer material were

much lighter and more homogeneous with regard to density. Bending strength tested perpendicular to grain did not show significant differences between spruce and kiri. This can be attributed to the generally much lower bending strength of wood perpendicular to the grain and the corresponding high influence of the crossband veneer, which is tested in grain direction and, therefore, equalizes the results. Blockboards with kiri as core layer material are very interesting products for lightweight applications with low requirements with respect to mechanical strengths.

**Acknowledgements** The authors wish to acknowledge funding by the AiF Projekt GmbH (project no. KF2454610WZ4).

#### References

- Barton IL, Nicholas ID, Ecroyd CE (2007) Paulownia. For Res Bull 231:71
- DIN EN 636 (2015) Plywood—specifications; German version EN 636:2012 + A1:2015. DIN-Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), Berlin
- EN 310 (1993) Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 320 (2011) Particleboards and fibreboards—determination of resistance to axial withdrawal of screws; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- EN 323 (1993) Wood-based panels; determination of density; German version. European Committee for Standardisation, Brussels
- Marutzky R, Sauerwein P, Schwab H (2008) Sperrholz. Informationsdienst Holz, Reihe Informationsdienst Holz spezial. Fraunhofer-Institut für Holzforschung; Verband der Deutschen





Dafür wurden die Bohlen mit speziellen Stapelleisten auf ein Fahrgestell gestapelt (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Trockner Übersicht (links) und Kiriholz in Trockenkammer (rechts)

### 4.1.3 Bestimmung der physikalischen Eigenschaften

#### 4.1.3.1 Bestimmung der Roh- und Darrdichte

Die Bestimmung der Rohdichte wurde in Anlehnung an DIN 52182 (1976) durchgeführt. Definiert ist sie als der Quotient aus der Masse  $m$  und dem Volumen  $V$  des makroskopischen Holzes einschließlich des Porenraumes. Die Rohdichte des Holzes nach Lagerung im Normalklima bei  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $65 \pm 5 \%$  Luftfeuchtigkeit bis zur Gewichtskonstanz wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Rohdichte [g cm}^{-3}\text{]} = \frac{m_N}{V_N} \quad \text{Formel 4-1}$$

$m_N$  = Masse des Prüfkörpers im Normalklima (g)

$V_N$  = Volumen des Prüfkörpers im Normalklima ( $\text{cm}^3$ )

Die Rohdichte des Holzes im absolut trockenen Zustand (Darrdichte) wurde bestimmt nach Lagerung bei  $103 \text{ }^\circ\text{C}$  in einem Ofen bis zur Gewichtskonstanz und nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Darrdichte [g cm}^{-3}\text{]} = \frac{m_0}{V_0} \quad \text{Formel 4-2}$$

$m_0$  = Masse des Prüfkörpers im absolut trockenen Zustand (g)

$V_0$  = Volumen des Prüfkörpers im absolut trockenen Zustand ( $\text{cm}^3$ )

#### 4.1.3.2 Bestimmung des Holzfeuchte

Die Bestimmung der Holzfeuchte wurde nach DIN 52183 (1977) durchgeführt. Die prozentuale Holzfeuchte ist das Verhältnis zwischen der Masse des in der Holzprobe enthaltenen Wassers und der Masse der wasserfreien (darrgetrockenen) Probe. Die Feuchte beeinflusst wesentlich physikalische und technologische Eigenschaften des Holzes und wurde nach folgender Formel errechnet:

$$\text{Holzfeuchte [\%]} = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \text{Formel 4-3}$$

$m_u$  = Masse der feuchten Holzprobe (g)

$m_0$  = Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Holzprobe (g)

#### 4.1.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls (siehe Kap. 4.1.4.1), Bestimmung der Zugfestigkeit (siehe Kap. 4.1.4.2), Bestimmung der Druckfestigkeit (siehe Kap. 4.1.4.3), Bestimmung des Schraubenausziehwiderstandes (siehe Kap. 4.1.4.4) und Bestimmung des Eindruckwiderstandes (siehe Kap. 4.1.4.6) gemäß der entsprechenden Normen durchgeführt.

##### 4.1.4.1 Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls

Die Bestimmung der Biegefestigkeit und des Biege-Elastizitätsmoduls wurden in Anlehnung an DIN 52186 (1978) durchgeführt. Definiert wird die Biegefestigkeit als Quotient aus dem Biegemoment  $M$  und dem Widerstandsmoment  $W$  der Probe, woraus sich bei einem rechteckigem Probenquerschnitt und mittigem Kraftangriff folgende Berechnungsformel ergibt:

$$\text{Biegefestigkeit [N mm}^{-2}\text{]} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad \text{Formel 4-4}$$

$F_{\max}$  = Höchstkraft (N)

$l$  = Stützweite (mm)

$b$  = Probenbreite (mm)

$h$  = Probendicke (mm)

Es wurde die Versuchsanordnung für die Prüfung mit mittigem Kraftangriff (fehlerfreies Holz) gewählt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 4-2 gezeigt.

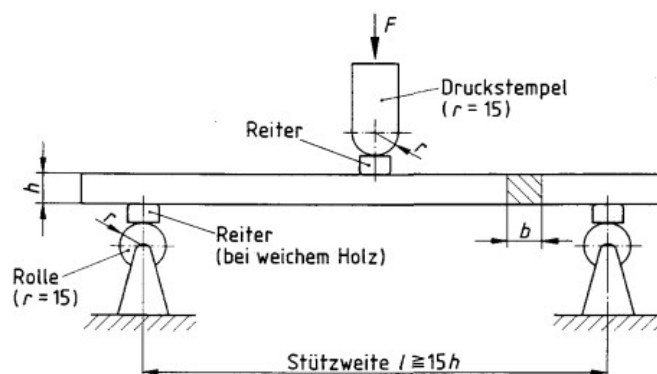


Abbildung 4-2: Drei-Punkt-Biegeversuch; Versuchsanordnung für Prüfung mit mittigem Kraftangriff (DIN 52186 1978)

Der Biege-Elastizitätsmodul ist eine Kenngröße für die Verformungssteifigkeit der Probe im elastischen Bereich. Aufgrund der gewählten Versuchsanordnung wurde er nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Biege – Elastizitätsmodul } [N \text{ mm}^{-2}] = \frac{l^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad \text{Formel 4-5}$$

l	= Stützweite	(mm)
b	= Probenbreite	(mm)
h	= Probendicke	(mm)
$\Delta F$	= eine beliebige Kraftdifferenz in N im elastischen Verformungsbereich der Probe	(N)
$\Delta f$	= die der Kraftdifferenz $\Delta F$ entsprechende Durchbiegung in Probemitte	(mm)

Die Prüfkörperabmaße betragen  $360 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ . Die Stützweite betrug 300 mm, entsprechend  $15h$ .

#### 4.1.4.2 Bestimmung der Zugfestigkeit

Die Bestimmung der Zugfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN 52188 (1979) durchgeführt. Sie beschreibt die auf den Anfangsquerschnitt  $A$  der Probe bezogene Höchstkraft  $F_{max}$  bei Zugbeanspruchung und wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Zugfestigkeit } [N \text{ mm}^{-2}] = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad \text{Formel 4-6}$$

$F_{max}$	= Höchstkraft	(N)
A	= Querschnittsfläche der Probe vor Beginn des Zugversuchs	(mm)
a, b	= Querschnittsmaße der Probe vor Beginn des Zugversuchs	(mm)

#### 4.1.4.3 Bestimmung der Druckfestigkeit

Die Bestimmung der Druckfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN 52185 (1976) durchgeführt. Sie ist definiert als die auf den Anfangsquerschnitt  $A$  der Probe bezogene Höchstkraft  $F_{max}$  bei Druckbeanspruchung und wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Druckfestigkeit } [N \text{ mm}^{-2}] = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad \text{Formel 4-7}$$

$F_{max}$	= Höchstkraft	(N)
A	= Querschnittsfläche der Probe vor Beginn des Druckversuchs	(mm)
a, b	= Querschnittsmaße der Probe vor Beginn des Druckversuchs	(mm)

Die Prüfkörperabmaße betragen  $30 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ .

#### 4.1.4.4 Bestimmung des Schraubenausziehwerstandes

Die Bestimmung des Schraubenausziehwerstandes wurde in Anlehnung an EN 320 (2011) durchgeführt. Er ist definiert als die Kraft, die erforderlich ist, um eine definierte Schraube aus dem Prüfkörper herauszuziehen und wird in N angegeben.

#### 4.1.4.5 Bestimmung der Bruchschlagarbeit

Die Bestimmung der Bruchschlagarbeit wurde in Anlehnung an DIN 52189-1 (1981) durchgeführt. Definiert ist sie als die auf den Anfangsquerschnitt  $A$  der Probe bezogene Arbeit  $W$ , die zum Durchschlagen des Probestabes erforderlich ist und wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Bruchschlagarbeit [kJ m}^{-2}] = \frac{1000 \cdot W}{A} = \frac{1000 \cdot W}{b \cdot h} \quad \text{Formel 4-8}$$

$W$  = Arbeit, die zum Durchschlagen der Probe erforderlich ist (J)

$A$  = Querschnittsfläche der Probe vor Beginn (mm<sup>2</sup>)

$a, b$  = Querschnittsmaße der Probe vor Beginn (mm)

#### 4.1.4.6 Bestimmung des Eindruckwiderstandes

Die Bestimmung des Eindruckwiderstandes wurde in Anlehnung an EN 1534 (2010) durchgeführt. Die Eindruckfestigkeit wird bestimmt, indem ein belasteter Eindringkörper auf die Oberseite des Prüfkörpers aufgebracht wird. Der Durchmesser des Resteindrucks wird verwendet, um die Eindruckfestigkeit des Prüfkörpers zu beurteilen. Nach Belastung wird der unbelastete Prüfkörper einer Erholungszeit ausgesetzt. Die Brinell-Härte wird nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Brinell – Härte [N mm}^{-2}] = \frac{2F}{g \cdot \pi \cdot D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \text{Formel 4-9}$$

$F$  = aufgebrachte Höchstkraft (N)

$g$  = Erdbeschleunigung (m sec<sup>-2</sup>)

$\pi$  = Faktor „Pi“ (3,14)

$D$  = Kugeldurchmesser (mm)

$d$  = Durchmesser des Resteindrucks (mm)

$d_1$  = Durchmesser längs zum Faserverlauf (mm)

$d_2$  = Durchmesser quer zum Faserverlauf (mm)

Die Prüfkörperabmaße betragen 30 x 30 x 30 mm<sup>3</sup>. Die Brinell-Härte wurde auf radialer und tangentialer Schnittfläche, und auf Hirnholzfläche bestimmt.

#### 4.1.5 Mykologische Untersuchungen

##### 4.1.5.1 Braun- und Weißfäule

Die Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit gegenüber Braun- und Weißfäule wurde nach DIN CEN/TS 15083-1 (2005) durchgeführt. Hierbei wurden Prüfkörper mit Abmaßen von 50 x 25 x 15 mm<sup>3</sup> sowohl aus dem zu prüfenden Holz als auch aus der Referenzholzart, einem Angriff durch Reinkulturen holzerstörender Pilze ausgesetzt. Als Braunfäule wurde *Coniophora puteana* (Schumacher ex Fries), Karsten (Stamm BAM Ebw. 15) und als Weißfäule wurde *Trametes versicolor* (Linnaeus) Quélet, (Stamm CTB 863A) eingesetzt. Zur Vorbereitung wurden je Kolleschale 0,875 g Agar eingewogen. Nach dem Ansetzen des Malz-Agar-Nährmediums wurde die Kolleschalen mit je 75 ml befüllt, sterilisiert und ausgehärtet. Zum Beimpfen der Kolleschalen wurden kleine Plättchen (Inokula) des in einer Petrischale auf einem Malz-Agar-Nährmedium gezüchteten Prüfpilzes ausgestanzt und mittig in den Kolleschalen auf dem Nährmedium platziert. Anschließend wurden sie im Normalklima bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % Luftfeuchtigkeit für sieben Tage gelagert. Danach wurden sie mit Aluminiumfolie umwickelt und zusammen mit den benötigten Unterlegscheiben im Autoklav bei 21 °C für eine Dauer von 20 min trockensterilisiert. Vor Einbau der Prüfkörper in die Kolleschalen wurden die Anfangstrockenmassen bestimmt. Unter der Sterilbank wurden im Anschluss jeweils zwei der Prüfkörper in eine der Kolleschalen, auf Unterlegscheiben auflagernd, links und rechts neben dem Inokulum des jeweiligen Prüfpilzes mit einer Langpinzette platziert. Die Kontrollprüfkörper ohne Prüfpilz wurden in unbeimpfte Schalen auf die gleiche Weise eingebaut. Nach dem Einbau aller Prüfkörper in die Kolleschalen erfolgte die Lagerung dieser für 16 Wochen in einem Klimaraum bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % Luftfeuchtigkeit. Nach Ablauf der vorgeschriebenen Testzeit von 16 Wochen wurden die Prüfkörper aus den Kolleschalen mit einer Langpinzette ausgebaut, von Prüfpilzresten gereinigt und gewogen. Im Anschluss wurden zur Bestimmung der End-Trockenmasse die Prüfkörper bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Feuchte und der Masseverlust für jeden Prüfkörper wurden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\text{Feuchte [\%]} = \frac{m_2 - m_3}{m_3} \cdot 100 \quad \text{Formel 4-10}$$

$m_2$  = Masse nach Beendigung der Prüfung (g)

$m_3$  = End-Trockenmasse (g)

$$\text{Masseverlust [\%]} = \frac{m_i - m_3}{m_i} \cdot 100 \quad \text{wobei } m_i = m_1 \cdot \frac{100}{100 + FG} \quad \text{Formel 4-11}$$

$m_1$  = Masse des Prüfkörpers nach Konditionierung (g)

$m_3$  = End-Trockenmasse des Prüfkörpers (g)

$m_i$  = Ursprüngliche Trockenmasse des Prüfkörpers (g)

FG = mittlere Feuchte (g)

Der prozentuale Verlust der Prüfkörper an Trockenmasse dient zur Abschätzung der Beständigkeit des zu prüfenden Holzes gegen Angriffe durch die Prüfpilze und wird als Grundlage für eine Dauerhaftigkeitseinstufung verwendet (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Dauerhaftigkeitsklassen nach DIN CEN/TS 15083-1 (2005)

Dauerhaftigkeitsklasse	Beschreibung	Masseverlust in [%]
1	Sehr dauerhaft	≤ 5
2	Dauerhaft	> 5 to ≤ 10
3	Mäßig dauerhaft	> 10 to ≤ 15
4	Wenig dauerhaft	> 15 to ≤ 30
5	Nicht dauerhaft	> 30

#### 4.1.5.2 Moderfäule

Die Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit gegenüber Moderfäulepilzen wurde in Anlehnung an DIN CEN/TS 15083-2 (2005) durchgeführt. Hierbei wurden Prüfkörper mit Abmaßen von 100 x 10 x 5 mm<sup>3</sup> aus sowohl dem zu prüfenden Holz als auch dem Referenzholz (*Fagus sylvatica* L.) einem Angriff durch Moderfäule hervorrufenden Pilzen ausgesetzt.

Zur Vorbereitung der Versuchserde wurde diese mit einem Rundsieb (1,2 cm Maschenweite) gesiebt und im Anschluss im Verhältnis 70:30 mit Sand vermischt. Danach erfolgten die Bestimmung des Feuchtegehalts der Versuchserde beim Erreichen der Wasserhaltekapazität (WHK) sowie die Berechnung der benötigten Wassermenge (Tabelle 4-3). Da die WHK der Komposterde über der in der Norm angegebenen Grenze von 60 % lag, wurde noch weiterer Sand hinzugefügt.

Tabelle 4-3: Parameter zur Vorbereitung der Versuchserde

Parameter der Versuchserde	
Feuchtegehalt beim Erreichen der WHK [%]	70,6
Feuchtegehalt bei WHK von 95 % [%]	67,1
Feuchtegehalt bei WHK von 95 % nach extra Sandzugabe [%]	48,1
Gesamtgewicht des Bodens in Testbox [kg]	14,6
Wasserzugabe [l]	1,67

Die Prüfkörper wurden bei 103 °C bis zur Gewichtskonstanz darrgetrocknet, vermessen und gewogen. Vor Einbau wurden die Prüfkörper bei 20 ± 1 °C und 65 ± 5 % Luftfeuchtigkeit bis zur Gewichtskonstanz konditioniert und gewogen. Die Prüfkörper wurden dann im Abstand von 20 mm zueinander und von den Seiten des Behälters senkrecht in die Erde eingesetzt. Die Einstecktiefe betrug ca. 80 mm. Zur Aufrechterhaltung der Substratfeuchte wurde vor Beginn der Prüfung die beschickten Kisten ohne Deckel gewogen und deren Ausgangsmasse bestimmt. In 4-wöchigen Abständen wurden die Kisten erneut gewogen und der Masseverlust infolge der Wasserabgabe durch Wiederhinzufügen von Wasser ausgeglichen. Dazu wurde das Wasser gleichmäßig auf der Oberfläche der Erde verteilt. Nach Woche 16 und 20 der laufenden Prüfung wurden 10 Referenzprüfkörper ausgebaut und deren Masseverlust gemessen, um zu evaluieren, ob die diese schon einen Masseverlust von 20 % erreicht haben.

Nach 24 Wochen wurde der Versuch beendet und Feuchtegehalt und Masseverlust eines jeden Prüfkörpers wurden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\text{Feuchte [\%]} = \frac{m_2 - m_3}{m_3} \cdot 100 \quad \text{Formel 4-12}$$

$m_2$  = Masse nach Beendigung der Prüfung (g)

$m_3$  = End-Trockenmasse (g)

$$\text{Masseverlust [\%]} = \frac{m_1 - m_3}{m_1} \cdot 100 \quad \text{Formel 4-13}$$

$m_1$  = Trockenmasse des Prüfkörpers (g)

$m_3$  = End-Trockenmasse des Prüfkörpers (g)

#### 4.1.6 Statistik

Die deskriptive Statistik, in Form von Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung, wurde mit der Software Statistica (Version 13.3, Tibco Software, Palo Alto, USA) durchgeführt.

## 4.2 Anatomie des Holzes

### 4.2.1 Makroskopische Betrachtungsebene

Der Querschnitt, auch Hirnholz genannt, erfolgt quer zur Faserrichtung (Stammachse) und ist zur besseren Kenntnis des anatomischen Baus des Holzkörpers von großer Bedeutung (Wagenführ 1999, S. 20). Das Holz (Abbildung 4-3, *links*) wird umgeben von der Rinde, welche sich aus Außenrinde (Borke) und Innenrinde (Bast) zusammensetzt.

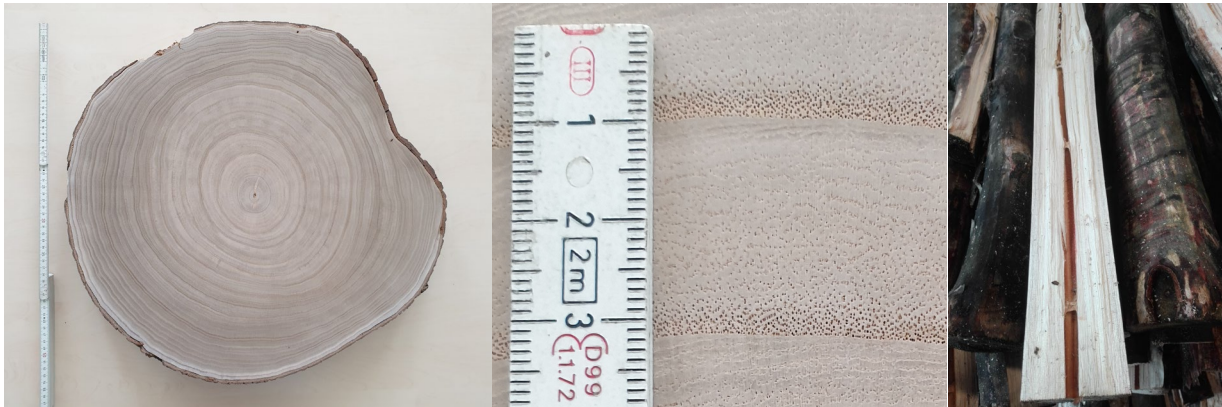


Abbildung 4-3: *Paulownia tomentosa* – Parkbaum, 22 Jahre, aus der Region Bonn. Übersichtsbild Querschnitt mit etwa 56 cm Durchmesser (*links*) und Jahrring-Nahaufnahme (*Mitte*); segmentierte Markröhre (*rechts*)

Der Holzteil lässt sich unterscheiden in das dunklere Kernholz und das hellere Splintholz, wobei bei Kiri die Farbunterschiede gering ausfallen und meist nur die äußeren beiden Jahrringe Splintholz sind. Zudem lassen sich Zuwachszonen, welche auch Jahrringe genannt werden, erkennen (Abbildung 4-3, *Mitte*). Die Jahrringe unterteilen sich in Früh- und Spätholz. Im Frühholz bildet Kiri deutlich weitlumigere Gefäße aus, welche einen klaren Übergang zum Spätholz bilden, weshalb es auch zu den ringporigen (wie auch halbringporigen) Laubhölzern zählt. In den ersten fünf Lebensjahren des Baumes können die Jahrringe bis zu 5 cm breit werden, was im Vergleich zu heimischen Laubhölzern wie z.B. der Buche (*Fagus sylvatica* L.) enorm ist, da bei der Buche die Jahrringe meist nur einige Millimeter breit werden. Koman et al. (2017) zeigten ebenfalls, dass *Paulownia tomentosa* aus Ungarn in den ersten 5 Jahren Jahrringbreiten von bis zu 3,5 cm erreichten. Je älter der Baum wird, desto schmaler werden i.d.R. auch die Jahrringe. Ungefähr in der Mitte des Querschnitts befindet sich die Markröhre (Abbildung 4-3, *links*). Kiri besitzt eine segmentierte und teilweise sehr ausgeprägte (ca. 2 cm Durchmesser) Markröhre.

### 4.2.2 Mikroskopische Betrachtungsebene

Kiri gehört zu den entwicklungsgeschichtlich jüngeren Laubhölzern. In Abbildung 4-4 (*Querschnitt*), Abbildung 4-5 (*Radialschnitt*) und Abbildung 4-6 (*Tangentialschnitt*) sind die wichtigsten Zelltypen zu finden. Die Gefäße, auch Tracheen genannt, werden nur von Laubhölzern ausgebildet und dienen vorwiegend der Wasserleitung. Um die Gefäße befinden sich die Axialparenchymzellen. Sie dienen der Leitung und Speicherung von Reservestoffen, sind dünnwandiger und weitlumiger als die Faser-



tracheiden und Libriformfasern, welche der Festigung dienen. Ebenfalls zu sehen sind die Holzstrahlen, auch Radialparenchym genannt. Sie dienen der radialen Leitung und Speicherung der vom Baum gebildeten Stoffe.

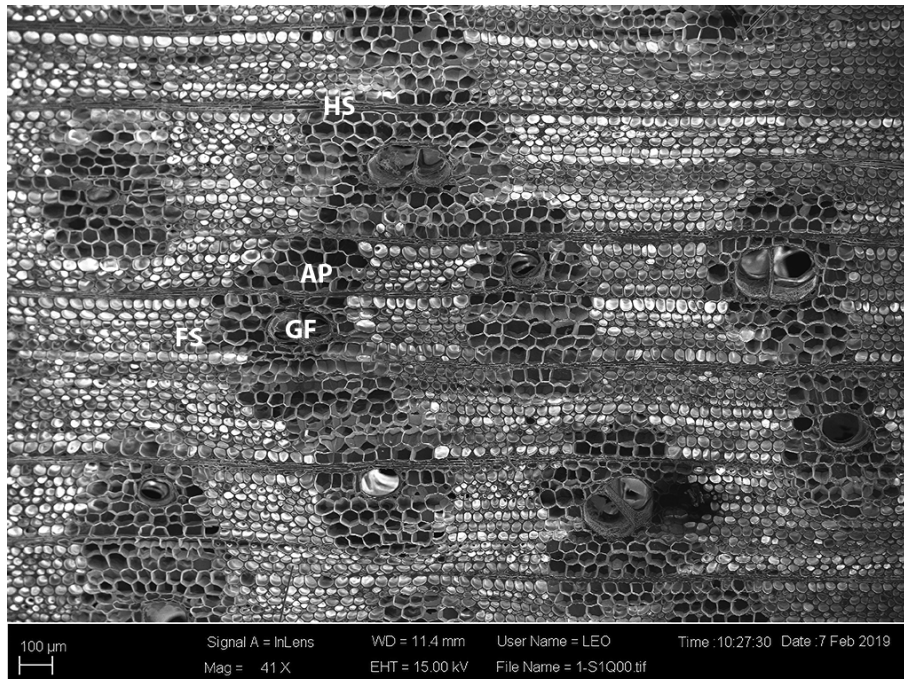


Abbildung 4-4: Querschnitt von Kiriholz aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskop (GF = Gefäß, AP = Axialparenchym, FS = Faser, HS = Holzstrahl)

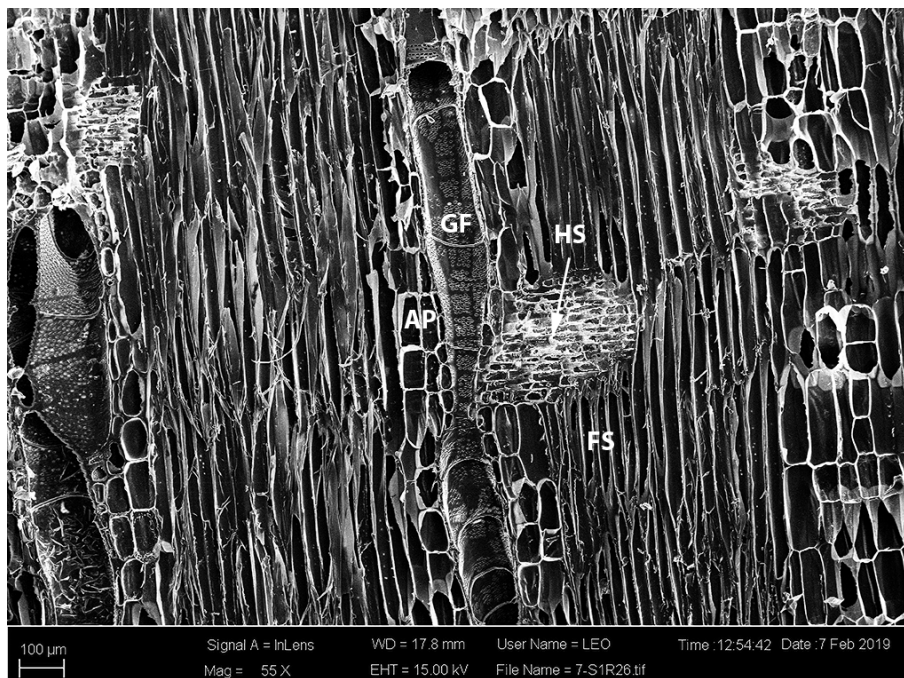


Abbildung 4-5: Radialschnitt von Kiriholz aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskop (GF = Gefäß, AP = Axialparenchym, FS = Faser, HS = Holzstrahl)

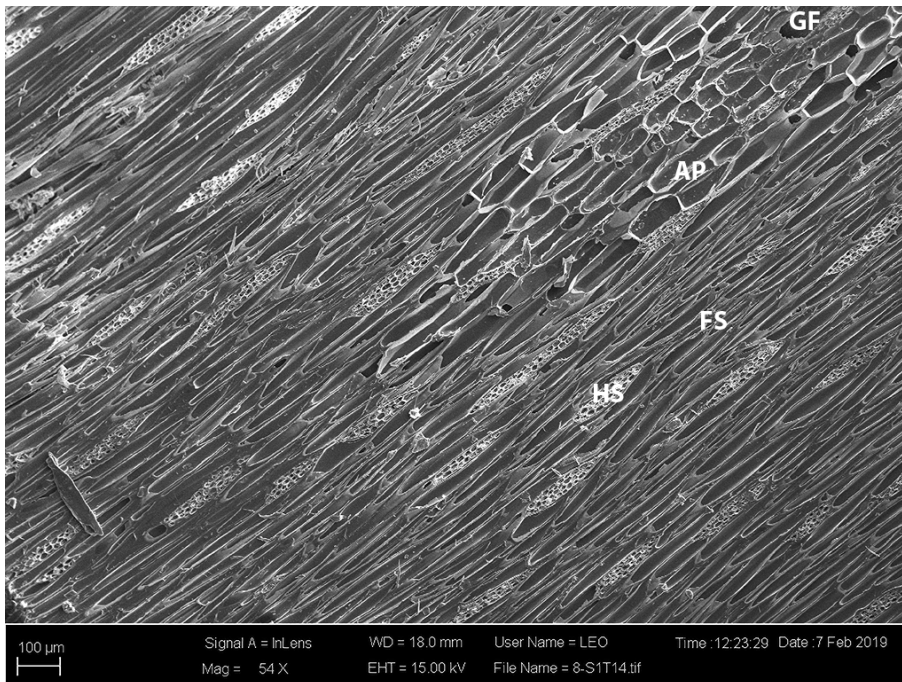


Abbildung 4-6: Tangentialschnitt von Kiriholz aufgenommen mittels Rasterelektronenmikroskop (GF = Gefäß, AP = Axialparenchym, FS = Faser, HS = Holzstrahl)

### 4.3 Physikalische und mechanische Eigenschaften

Im Zuge der Bestimmung einiger wichtiger physikalischer Eigenschaften von Kiriholz wurden die Roh- und Darrdichte, sowie die Holzfeuchte bei 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit bestimmt (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Einige physikalische Eigenschaften von Kiriholz

Eigenschaften	Norm (i.A.)	Einheit	Stichprobenanzahl	Minimum / Mittelwert / Maximum (Standardabweichung)
Rohdichte	DIN 52182	kg m <sup>-3</sup>	59	218 / 268 / 353 (± 31)
Darrdichte	DIN 52182	kg m <sup>-3</sup>	60	205 / 253 / 335 (± 30)
Holzfeuchte (20/65)	DIN 52183	%	62	10,1 / 11,1 / 12,3 (± 0,43)

Es wurden folgende mechanische Eigenschaften ermittelt: Biegefestigkeit, Biege E-Modul, Zugfestigkeit (parallel zur Faser), Druckfestigkeit (parallel zur Faser), Bruchschlagarbeit, Eindruckwiderstand (radial, tangential, longitudinal) und Schraubenauszieh-widerstand (radial, tangential, longitudinal) (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Einige mechanische Eigenschaften von Kiriholz

Eigenschaften	Norm (i.A.)	Einheit	Stichprobenanzahl	Minimum / Mittelwert / Maximum (Standardabweichung)
<i>Biegefestigkeit</i>	DIN 52186	N mm <sup>-2</sup>	33	36,2 / 42,5 / 50,5 (± 6,7)
<i>Biege E-Modul</i>	DIN 52186	N mm <sup>-2</sup>	33	3120 / 5033 / 6842 (± 967)
<i>Zugfestigkeit (parallel zur Faser)</i>	DIN 52188	N mm <sup>-2</sup>	53	27,2 / 43 / 61,7 (± 7,3)
<i>Druckfestigkeit (parallel zur Faser)</i>	DIN 52185	N mm <sup>-2</sup>	49	14,6 / 23,4 / 40,3 (± 6,7)
<i>Bruchschlagarbeit</i>	DIN 52189	N mm <sup>-2</sup>	46	0,01 / 0,022 / 0,034
<i>Eindruckwiderstand (radial)</i>	EN 1534	N mm <sup>-2</sup>	18	4,8 / 7,2 / 10,7 (± 1,7)
<i>Eindruckwiderstand (tangential)</i>	EN 1534	N mm <sup>-2</sup>	18	5,0 / 7,3 / 12,3 (± 2,1)
<i>Eindruckwiderstand (longitudinal)</i>	EN 1534	N mm <sup>-2</sup>	50	16,4 / 23,5 / 31,4 (± 4,4)
<i>Schraubenausziehwi- derstand (radial)</i>	EN 320	N	50	338 / 511 / 737 (± 110)
<i>Schraubenausziehwi- derstand (longitudinal)</i>	EN 320	N	50	175 / 509 / 771 (± 131)
<i>Schraubenausziehwi- derstand (tangential)</i>	EN 320	N	50	236 / 544 / 793 (± 139)

#### 4.4 Dauerhaftigkeiten (mykologische Untersuchungen)

Im Zuge der mykologischen Untersuchungen wurde die natürliche Dauerhaftigkeit von Kiriholz gegenüber holzerstörenden Pilzen (Braun- und Weißfäule, Moderfäule) bestimmt (siehe Kap. 4.1.5). In Tabelle 4-6 sind die Masseverluste und Feuchten von Kiri und der Referenz dargestellt.

Tabelle 4-6: Masseverluste und Feuchten nach Beendigung der mykologischen Untersuchungen

	Kiriholz		Referenz	
	Masseverlust [%]	Feuchte [%]	Masseverlust [%]	Feuchte [%]
<i>Braunfäule Coniophora puteana</i>	0,4	94,2	32,8	74,4
<i>Weißfäule Trametes versicolor</i>	43,3	96,3	29,5	48,7
<i>Moderfäule</i>	46,4	512,7	17,5	139,3

In Tabelle 4-7 sind die Dauerhaftigkeitsklassen gegenüber Braun-, Weiß- und Moderfäule zu sehen.

Tabelle 4-7: Dauerhaftigkeiten von Kiriholz

	Norm (i.A.)	Pilz / Dauerhaftigkeitsklasse
<i>Dauerhaftigkeit gegenüber Braunfäule Coniophora puteana</i>	DIN CEN/TS 15083-1	Dauerhaftigkeitsklasse 1 (unter Vorbehalt)
<i>Dauerhaftigkeit gegenüber Weißfäule Trametes versicolor</i>	DIN CEN/TS 15083-1	Dauerhaftigkeitsklasse 5
<i>Dauerhaftigkeit gegenüber Moderfäule</i>	DIN CEN/TS 15083-2	Dauerhaftigkeitsklasse 5 (unter Vorbehalt)



## 5 ALLGEMEINE DISKUSSION

Im Zuge der aktuellen Herausforderungen wie Rohstoffverknappung, Konkurrenzsituation zwischen stofflicher und energetischer Nutzung oder Waldumbaumaßnahmen (siehe Kap. 1.1), mit welchen sich die Holzwerkstoffindustrie beschäftigt, kann der Einsatz von schnellwachsenden Baumarten auf Kurzumtriebsplantagen (KUP) einen Teil zur Lösung beitragen. In Deutschland werden die meisten KUP für die Erzeugung von Energieholz mit Pappel und Weide genutzt und werden als mögliche Ergänzung für die stark nachgefragten Energieholzsortimente aus der Forstwirtschaft gesehen (Bärwolff et al. 2012). Die stoffliche Nutzung spielt bisher eine untergeordnete Rolle. Kiri (*Paulownia* spp.), aus Ost-Asien stammend, eignet sich aufgrund diverser artenspezifischer Eigenschaften, wie schnellwachsend, geringe Umtriebszeit, bei guter Pflege auch geradwüchsig und weitestgehend astfrei, sehr gut für die Produktion von Wertholz zur stofflichen Nutzung. Die Umtriebszeit liegt i.d.R. zwischen 12 und 15 Jahren, wobei bereits nach 5 Jahren eine erste Entnahme getätigt werden kann. WeGrow (2020) erläutert, dass der Absatzmarkt von Kiriholz groß sei und allein in China jährlich bereits über vier Millionen Kubikmeter zu Möbeln, Markisen, Jalousien, Türen, Musikinstrumenten, Sportgeräten, Holzwerkstoffen, Furnieren und vielen weiteren Produkten verarbeitet werden. In Deutschland nutzt z.B. der Edelmöbelhersteller hülsta® (hülsta-werke Hüls GmbH & Co. KG) Kiriholz als Vollholz-Kernlage für aktuelle Möbelkollektionen (Hülsta 2020). Die Herstellung von Tischlerplatten aus Kiri-Vollholz wurde auch in Publikation 5 „**Comparison of blockboards with core layers made of kiri (*Paulownia* spp.) and of spruce (*Picea abies*) regarding mechanical properties**“ (siehe Kap. 3.5) behandelt. Interessant ist, dass Tischlerplatten mit einer Kernlage aus Kiri zwar geringere Festigkeiten als herkömmliche Tischlerplatten mit Kernlage aus Fichte aufwiesen, aber auch 31 % leichter waren und vor allem eine homogenere Kernlage in Bezug auf die Dichte bildeten, womit Forschungshypothese 5-i (siehe Kap. 1.3.5) verifiziert ist. Nach Marutzky und Sauerwein (2008) wurde die Tischlerplatte in der Massenproduktion von anderen Holzwerkstoffen ersetzt, jedoch sind extraleichte Tischlerplatten mit Rohdichten zwischen 150 und 330 kg m<sup>-3</sup> von besonderem Interesse für dicke Tisch- und Küchenarbeitsplatten, Stollenregale oder im Laden-, Caravan- und Fahrzeugbau, da wiederum im Innenausbau Spanplatten und MDF schnell die physikalischen Grenzen von Produktionstechnologie, Gewicht und Biegefestigkeit erreichen. Der Einsatz von Kiri aus Deutschland könnte hier die sonst verwendeten Baumarten Albasia, Fuma und Balsa aus exotischen Ländern ersetzen und einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Somit würde wiederum eine direkte Umsetzung wichtiger Ziele der Charta für Holz 2.0, wie Erhöhung des kurz- und mittelfristigen Holzpotenzials aus der Erschließung ungenutzter und alternativer Rohstoffquellen, Herstellung leichterer Holzwerkstoffe und vielen mehr, erfolgen (Alfter et al. 2018).

Aktuell gibt es für Deutschland keine öffentlichen Zahlen zum Absatz oder Anbau von Kiriholz. In den letzten 15 Jahren sind jedoch einige Unternehmen entstanden, die sich professionell mit dem Anbau von Kiri auf KUP beschäftigen, wie WeGrow GmbH (Tönisvorst, Deutschland), Cathaia International GmbH & Co. KG (München, Deutschland), Green Wood International AG (Rorschach, Schweiz) oder Oekotree GmbH (Kilb, Österreich). Alle Firmen bieten Möglichkeiten, ein nachhaltiges Investment in Kiri-KUP zu tätigen.

Aufgrund der geringen Dichte (siehe Kap. 4.3) kann Kiriholz sowohl als Vollholz, als auch in Holzwerkstoffen für den Leichtbau interessant sein. Hauptziele des Leichtbaus sind die Steigerung der Ressourceneffizienz und Gewichtseinsparung. In der Logistikbranche machen sich diese beiden Elemente vor allem bemerkbar wegen des sinkenden Kraftstoffverbrauchs beim Transport, als auch dem verbesserten Verhältnis von Fahrzeug zu Frachtgewicht. In der Verarbeitung sind leichte Werkstoffe besser zu handhaben und schonen die Gesundheit der Arbeitskräfte. Aktuell finden aus diesem Grund Leichtbauplatten auch häufig Verwendung im Messe- und Ladenbau, da dort schnell und unter hohem Zeitdruck auf- und abgebaut werden muss. Weitere Gebiete, in denen Leichtbauplatten entscheidende Vorteile erzielen können, sind Schiffs-, Fahrzeug- und Caravanbau. Aufgrund geringer Festigkeiten (siehe Kap. 4.3) eignet sich das Kiriholz nicht zur Herstellung tragender Konstruktionen. Das Argument der Nachhaltigkeit greift bei der Nutzung von Kiri als Vollholz, da Holz ein regenerierbarer Rohstoff ist und das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid bindet.

In Kap. 4 wurde eine Charakterisierung von Kiriholz durchgeführt. Es wurden die wichtigsten makro- und mikroskopischen Holzmerkmale (siehe Kap. 4.2) dargestellt, einige physikalische (Tabelle 4-4) und mechanische Eigenschaften (Tabelle 4-5) erhoben, sowie die Dauerhaftigkeit gegenüber holzerstörenden Pilzen (Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7) getestet. Mit Bezug auf Kap. 4.1.4, ist klarzustellen, dass bei der Erhebung der mechanischen Festigkeiten von Kiriholz das generelle Problem auftritt, dass es nicht möglich ist, wie in den entsprechenden Normen gefordert, die Querschnittsabmessungen des Prüfkörper so auszuwählen, dass möglichst fünf Zuwachszonen erfasst sind. Bei dem verwendeten Material (siehe Kap. 4.1.1) handelt es sich um neunjährige Kiribäume, wobei die Zuwachszonen 2 bis 5 cm umfassten. Die in den Normen vorgegebenen Prüfkörpermaße wurden beibehalten, da die Prüfkörper sonst zu große Dimensionen angenommen hätten, jedoch wurde die Prüfkörperanzahl auf 30 bis ca. 60 erhöht. Es wurde bei der Herstellung der Prüfkörper darauf geachtet, dass möglichst ein voller Jahrring abgebildet war. Dies war jedoch aufgrund des Ausgangsmaterials nicht grundsätzlich durchführbar aufgrund der Ausgangsdicke von 35 mm. So gab es auch Prüfkörper, die nur aus Früh- oder Spätholz bestanden. Die Ergebnisse der physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind vergleichbar mit Zhu et al. (1986), Akyildiz und Kol (2010) und Koman et al. (2017). Die Forschungshypothesen 6-i ist somit verifiziert. In den Veröffentlichungen Zhu et al. (1986) und Akyildiz und Kol (2010) wird Kiriholz ein sehr gutes „strength-to-weight ratio“, also eine hohe spezifische Festigkeit nachgesagt. Die Ergebnisse dieser Studie im Vergleich mit Daten von Nelis (2014), welche unter den gleichen Bedingungen erhoben wurden, weisen bei Kiriholz keine Besonderheiten in Bezug auf die spezifischen Festigkeiten auf (Tabelle 5-1). Die Forschungshypothese 6-iii wird demnach zurückgewiesen.

Tabelle 5-1: Spezifische Festigkeiten einiger europäische Laubholzarten aus Nelis (2014) (markiert mit \*) und von Kiri

Holzart	Spezifische Zugfestigkeit [kN m kg <sup>-1</sup> ]	Spezifische Druckfestigkeit [kN m kg <sup>-1</sup> ]	Spezifische Biegefestigkeit [kN m kg <sup>-1</sup> ]
Ahorn*	223	85	172
Buche*	176	69	168
Eiche*	117	70	133
<b>Kiri</b>	<b>157</b>	<b>86</b>	<b>159</b>

Kiriholz besitzt gegenüber Weißfäule (*Trametes versicolor*) keine Resistenzen und wird in die niedrigste Dauerhaftigkeitsklasse, Dauerhaftigkeitsklasse 5, und gegenüber Braunfäule (*Coniophora puteana*) in die höchste Dauerhaftigkeitsklasse, Dauerhaftigkeitsklasse 1, nach DIN CEN/TS 15083-1 (2005) eingestuft. Die Feuchte der Braunfäule-Prüfkörper lag im Mittel bei 94 %. In EN 113 (1996) wird ein Versuch, bei welchem der Masseverlust der Prüfkörper unter 3 % lag und die Endfeuchte über 80 %, nicht gewertet. Gegen einen ausgebliebenen Befall des Pilzes aufgrund einer zu hohen Feuchte (von über 80 %) durch die Atemprozesse des Pilzes spricht, dass auch Prüfkörper mit nur 65 % Endfeuchte nicht abgebaut wurden. Versuche weiterer Autoren zeigen Kiriholz als nicht resistent gegenüber Weißfäule (Akhtari et al. 2013; Akhtari und Arefkhani 2013; Akhtari und Ganjipour 2013; Kirker et al. 2013b; Ghorbani und Asghari 2016). Pohleven und Petric (1997) jedoch weisen Kiriholz eine exzellente Dauerhaftigkeit gegenüber sowohl Braun- als auch Weißfäule nach. Olson und Carpenter (1985) zeigen, dass junges Kiriholz (*Paulownia tomentosa*) durchschnittlich 13 % Extraktstoffe enthält und stellen fest, dass dieser Wert im Vergleich mit anderen schnellwüchsigen Laubholzarten hoch ist. Kirker et al. (2013a) schlussfolgern dazu, dass es sich hierbei um lösliche Zucker der Hemicellulose handeln könnte, da der Extraktstoffgehalt im Splintholz größer als im Kernholz war. Extraktstoffe aus dem Kernholz haben eine blockierende, antioxidative, antivirale, bakterizide und fungizide Wirkung (Ragon et al. 2008; Walker 2006, S. 60; Hassan et al. 2018). Der Extraktstoffgehalt variiert nicht nur von Baum zu Baum, sondern auch innerhalb eines einzelnen Baumes (Scheffer und Cowling 1966). Kirker et al. (2013a) kategorisieren Kiriholz als dauerhaft gegenüber Braunfäule und moderat dauerhaft gegenüber Weißfäule. Die Ergebnisse von Akcay et al. (2020) zeigen Kiriholz als nicht dauerhaft gegenüber Weißfäule und Braunfäule (*Neolentinus lepideus*), wobei eine Behandlung des Kiriholzes mit Propolis, eine von Bienen hergestellte harzartige Masse, den Holzabbau deutlich verringert. Weitere Studien zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Kiriholz durch verschiedene Prozesse sind verfügbar (Akhtari et al. 2013; Akhtari und Arefkhani 2013; Akhtari und Ganjipour 2013; Kirker et al. 2013a und 2013b; Ghorbani und Asghari 2016). Kiriholz besitzt gegenüber Moderfäule keine Resistenzen und wird unter Vorbehalt in die niedrigste Dauerhaftigkeitsklasse, Dauerhaftigkeitsklasse 5, nach CEN/TS 15083-2 (2005) eingestuft. Auffällig ist, dass die Referenzholzart nach 24 Wochen Versuchslaufzeit nur ein Masseverlust von 17,5 % aufweist, wobei nach Norm 20 % Masseverlust gefordert sind, damit der Versuch gültig ist. Da trotz einer geringen Wirksamkeit der Moderfäule an der Referenz, eine starke Abbaurate (46,4 % Masseverlust) an Kiriholz festgestellt wurde, wurde die Einordnung unter Vorbehalt durchgeführt. Kirker et al. (2012) zeigen ebenfalls, dass Kiriholz in Erdkontakt nicht dauerhaft ist. Die Forschungshypothese 6-ii ist also nur teilweise verifiziert. Aufgrund der teilweise widersprüchlichen Ergebnisse im Vergleich mit Literaturwerten ist eine größer angelegte Forschungsstudie zum Thema Dauerhaftigkeit und Extraktstoffgehalt mit Kiri-Hölzern verschiedenen Ursprungs zu empfehlen.

Neben der Nutzung von Kiri als Vollholz liegt in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf der Evaluierung der Tauglichkeit von Kiriholz als Rohstoff für leichte Spanplatten. Diese Thematik wird in Fachzeitschriftenartikel 1 bis 4 (siehe Kap. 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4) behandelt. Die Ergebnisse der Publikationen 1, 2 und 4 zur Biege- und Querzugfestigkeit zeigen, dass grundsätzlich höhere Biege- und Querzugfestigkeiten erzielt werden, sobald Kirispäne (KS) anstatt von Industriespänen (IS) oder Fichtenspänen (FS) zum Einsatz kommen. Begründet liegt dies in der geringen Dichte des Holzes und der damit einhergehenden geringen Schüttdichte (Stegmann et al. 1965). Je geringer die Schüttdichte des Spanmaterials ist, desto voluminöser ist der Spankuchen vor dem Pressvorgang und desto höher der



Verdichtungsfaktor. Die einheitlichere und stärkere Verdichtung des Spanmaterials (siehe Kap. 3.1, Fig. 6) sorgt für eine Vergrößerung der Kontaktflächen zwischen den einzelnen Spänen, was eine effizientere Bindemittelausnutzung zur Folge hat. Die Ergebnisse bei einer Plattendichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  sind vergleichbar mit Clad und Pommer (1980) und Kalaycioglu et al. (2005). Studien mit anderen leichten Holzarten, wie z.B. Pappel (*Populus alba* L.) (Bektas et al. 2005), Sugi (*Cryptomeria japonica*) (Rofii et al. 2013) oder Kelempayan (*Neolamarckia cadamba*) (Rahman et al. 2019) führten ebenfalls zu hohen Biege- und Querkzugfestigkeiten. Die Ergebnisse von Vital et al. (1974) zeigen, dass bei Platten mit gleicher Plattendichte, aber unterschiedlichem Verdichtungsfaktor, ein hoher Verdichtungsfaktor auch zu einer höheren Biegefestigkeit und -E-Modul führt, und bestätigen somit die Ergebnisse. Zur Querkzugfestigkeit zeigen Vital et al. (1974) jedoch, dass bei gleichbleibender Plattendichte ein niedrigerer Verdichtungsfaktor zu höherer Querkzugfestigkeit führt. Dies kann hier nicht bestätigt werden.

Unterscheiden sich jedoch die Ausgangsrohichten des Holzes, welches zur Herstellung der Späne benutzt wurde, in großem Maße, wie das in Publikation 3 der Fall ist, zeigt sich, dass der Anstieg der Querkzug- und Abhebefestigkeit des Materials mit geringer Dichte (KS) im Gegensatz zum Material mit höherer Dichte (Buchenspänen), von 500 auf  $650 \text{ kg m}^{-3}$  wesentlich geringer ausfällt (siehe Kap. 3.3, Fig. 2 und Fig. 3). Dies legt nahe, dass der Verdichtungsfaktor sich, mit Bezug auf die Plattendichte, in niederen Bereichen stärker auf die Querkzug- und Abhebefestigkeit auswirkt als in höheren Bereichen und die festigkeitssteigernde Wirkung des Verdichtungsfaktors ab einem bestimmten Punkt ausbleibt. Auf die Biegefestigkeit scheint dies nicht zuzutreffen. Zudem kommt es bei hohem Verdichtungsfaktor häufiger zu technischen Problemen in Form von Dampfspaltern. In Publikation 4 (siehe Kap. 3.4) wurde zudem festgestellt, dass geringe Beimischungen von KS den höchsten relativen Effekt auf Biege- und Querkzugfestigkeiten haben. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit am Markt ist dies ein Argument, welches den Rohstoff Kiri umso interessanter macht, denn meist scheiterte ein Einsatz von schnellwachsenden Baumarten in der Holzwerkstoffindustrie an der geringen Verfügbarkeit (Ritter 2012). Die Evaluierung der Dickenquellung und Wasseraufnahme wurde in Publikation 1 (siehe Kap. 3.1) an einschichtigen Spanplatten und in Publikation 2 (siehe Kap. 3.2) an dreischichtigen Platten untersucht. Die Dickenquellung setzt sich sowohl aus der Quellung der Holzspäne, als auch der Freigabe innerer Spannungen, welche durch die Verdichtung der Holzpartikel entstanden ist, zusammen (Neusser et al. 1965; Gatchell et al. 1966; Ernst 1967), wobei Spanplatten mit hohem Verdichtungsfaktor ein höheres Bestreben zum Spannungsabbau aufweisen, als solche mit niedrigem Verdichtungsfaktor (Hann et al. 1963; Ernst 1967). Letzteres kann durch diese Studien nicht bestätigt werden, da beide Studien zu dem Ergebnis kommen, dass die Dickenquellung und Wasseraufnahme umso geringer ausfallen, je höher der Anteil an KS ist. Hier wirken die höhere Verdichtung und effizienteren Leimbindungen der Dickenquellung entgegen. Kiriholz weist sehr günstige Quell- und Schwindeigenschaften in radialer und tangentialer Richtung auf (Meier 2015, S. 180; Koman et al. 2017), wobei diese bei der Dickenquellung von Spanplatten eine untergeordnete Rolle spielen (Dunky und Niemz 2002, S. 899). Die Ergebnisse zur Volumenänderung von Akyildiz und Kol (2010) sind jedoch 20-30 % höher als von Koman et al. (2017). Zudem ist für dreischichtige Spanplatten hervorzuheben, dass eine gezielte Nutzung von KS in der Deckschicht zu einer geringeren Quellung führte. Dies ist auf die langsamere Wasseraufnahme zurückzuführen und die erhöhte Bindequalität zwischen den einzelnen Spänen. Boehme (1991) zeigt ebenfalls, dass die Deckschicht

die Dickenquellung beeinflussen kann. Jedoch stellte er, mittels unterschiedlicher Feuchten, unterschiedlich steile Rohdichteprofile bei ansonst gleichen Plattenherstellungsbedingungen her und beschrieb, dass die Verringerung der Dickenquellung nur als scheinbare Quellungsvergütung bezeichnet werden kann, da nicht die Bindequalität, sondern die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme verändert wurde. Roffael und Rauch (1972) zeigen, dass eine höhere Plattendichte zu einer höheren Dickenquellung und geringeren Wasseraufnahme führte als eine niedrige Plattendichte. Die Ergebnisse von Spanplatten einer Holzart mit unterschiedlicher Plattendichte (siehe Kap. 3.1, Fig. 3 und Fig. 4), hergestellt unter sonst selben Herstellungsbedingungen, bestätigen diese Feststellungen. Ein wichtiges Mittel zur Charakterisierung und Qualitätsüberprüfung einer Spanplatte ist die Erstellung eines Rohdichteprofiles. In dieser Arbeit wurden sie mittels Röntgenmethode erhoben. Hierbei wird über schichtweises Durchstrahlen senkrecht zur Plattenebene die Abschwächung der Strahlung gemessen und unter Berücksichtigung der Dicke die Rohdichte berechnet. Diese Methode wurde in Publikation 2 (siehe Kap. 3.2) und Publikation 3 (siehe Kap. 3.3) angewendet. Die Darstellungsweisen der Rohdichteprofile unterscheiden sich insofern, dass in Publikation 2 die mittleren Rohdichteprofile und in Publikation 3 die exemplarischen Rohdichteprofile gezeigt werden. In beiden Studien haben sich für die Spanplatte typische Rohdichteprofile gebildet, welche durch einen steilen Anstieg des Profils an beiden Rändern, Rohdichtemaximum in der Deckschicht, Rohdichteminimum in der Mitte des Plattenquerschnitts und einen mehr oder weniger steilen Verlauf des Profils mit kontinuierlichem Übergang von der Deck- zur Mittelschicht (Dunky und Niemz 2002, S. 886) charakterisiert sind. Alle hergestellten dreischichtigen Spanplatten wurden u.a. mit derselben Zielrohddichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  hergestellt, dementsprechend geht man bei allen Prüfkörpern von derselben mittleren Rohddichte aus. Das wiederum bedeutet in logischer Konsequenz für die unterschiedlichen Varianten, dass, wenn die Deckschicht eine höhere Dichte aufweist, die Mittelschicht eine niedrigere Dichte aufweisen muss. Bei unterschiedlichen Ausgangsrohddichten des verwendeten Materials zur Herstellung der Späne müssen noch die unterschiedlichen Verklebungscharakteristika aufgrund der Schüttdichte und des damit zusammenhängenden Verdichtungsfaktors (Verdichtungseffekt) mit einbezogen werden. Charakteristisch für die Rohdichteprofile mit KS in der Deckschicht ist ein nahezu linearer Abfall der Rohddichte bis zur Übergangszone zur Mittelschicht. Eine generelle Aussage zu Abhängigkeiten zwischen Dichteprofil und Festigkeiten bei Verwendung unterschiedlicher Holzarten kann nicht getroffen werden, da sich die Veränderung der Holzart auf immer mehr als eine Variable auswirkt und danach nicht eindeutig festgestellt werden kann, welche Variable welchen Effekt bewirkt hat. Dies deckt sich mit der Schlussfolgerung von Schulte und Frühwald (1996), dass Korrelationen sehr abhängig von Produktions- und Produktparametern wie Art und Menge des Bindemittels, Spandimensionen, Holzart, Verdichtungsfaktor, Feuchtigkeit im Spankuchen und den Einstellungen der Presse sind. Dennoch ist beim Vergleich von Spanplatten einer Holzart, hergestellt unter sonst selben Herstellungsbedingungen, mit zwei unterschiedlichen Rohddichten eine Abhängigkeit zwischen mittlerer Rohddichte und Querkzugfestigkeit zu sehen (siehe Kap. 3.3, Fig. 2). Dieses Ergebnis stimmt mit May (1983a) überein, wohingegen Kruse (1996) nur eine geringe Korrelation zwischen mittlerer Rohddichte und Querkzugfestigkeit feststellen.

In „**Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards**“ (siehe Kap. 3.1) wurde anhand von einschichtigen Spanplatten eine erste Evaluierung, ob Kiri als potenzielles Material für leichte Spanplatten in Frage kommt, durchgeführt. Hierfür wurden Spanplatten mit Zielrohddichten von  $350$ ,  $500$  und  $650 \text{ kg m}^{-3}$  produziert und neben den reinen Spanplatten aus KS und IS

auch zwei Mischungsverhältnisse mit Zielrohddichte  $350 \text{ kg m}^{-3}$  getestet. Neben Biegefestigkeit, Querkzugfestigkeit, Dickenquellung und Wasseraufnahme (siehe oben) wurden auch Formaldehydabgaben getestet. Alle Werte liegen unter dem in EN 13986 (2015) angegebenen Schwellenwert für Klasse E1 von  $8 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ . Jedoch zeigen Spanplatten mit KS bei Plattendichten von 350 und  $500 \text{ kg m}^{-3}$  eine erhöhte Abgabe von Formaldehyd im Vergleich zu FS. Wie in Kap. 2.2.3.2 erwähnt, setzt sich die Formaldehydabgabe einer Spanplatte aus unterschiedlichen Komponenten zusammen, wobei ca. 30 % dieser Abgabe durch das eingesetzte Holz bedingt wird. Die Formaldehydemissionen sind zudem bedingt durch eine Vielzahl an Faktoren, wobei Holzart, Spangeometrie, Leimverteilung und Verdichtungsfaktor zu den Faktoren zählen, welche einen Einfluss auf die Unterschiedlichkeit dieser Ergebnisse haben (Petersen et al. 1972, 1973, 1974). Bei einer Plattendichte von  $650 \text{ kg m}^{-3}$  zeigen sich keine Unterschiede zwischen KS und FS mit Bezug auf die Formaldehydabgabe. Die Gesundheitsschädlichkeit der Formaldehydabgabe wird schon seit dem „Gifthaus-Prozess“ im Jahr 1964 öffentlich diskutiert (Wagner 1997; Witkavel 2004) und führte in den 70er und 80er Jahren aufgrund von gesundheitsschädlichen Beeinträchtigungen und Irritationen, welche auf die Emissionen aus formaldehydhaltigen Produkten zurückgeführt wurden, zur Festlegung von Richtwerten und gesetzlichen Emissionsgrenzwerten (Oberdorfer 2008). Auch heute ist die Diskussion noch nicht abgeschlossen. So hat die EU im Jahr 2014 Formaldehyd als „kann Krebs erzeugen“ (Kategorie 1 B gemäß CLP Verordnung) eingestuft (UBA 2015). Das Umweltbundesamt weist zudem darauf hin, dass in den letzten Jahrzehnten rechtliche Regelungen (Gefahrenstoffverordnung/Chemikalienverbotsverordnung) zwar eine deutliche Verringerung der Formaldehydemissionen aus Holzwerkstoffen bewirkt haben, aber die Holzwerkstoffe, welche mit Harnstoff-Formaldehyd-Harzen produziert werden, immer noch eine bedeutende Emissionsquelle für Formaldehyd in der Innenraumluft darstellen. Am 01. Januar 2020 ist durch eine Kooperation des UBA und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), ein neues Prüfverfahren zur Formaldehydbestimmung unter realitätsnahen Bedingungen in Kraft getreten (UBA 2020).

Die Forschungshypothesen 1-i, 1-ii und 1-iii sind durch die Ergebnisse der Studie verifiziert. Forschungshypothese 1-iv wird zurückgewiesen, da der Einsatz von KS nicht zu einer Erhöhung der Dickenquellung und Wasseraufnahme geführt hat. Möglich Gründe dafür wurden im vorangegangenen Text diskutiert. Forschungshypothese 1-v ist für Spanplatten mit Plattendichten von  $650 \text{ kg m}^{-3}$  verifiziert, nicht jedoch für Plattendichten von 350 und  $500 \text{ kg m}^{-3}$ . Möglich Gründe dafür wurden im vorangegangenen Text diskutiert.

Nachdem die ersten Ergebnisse positiv ausgefallen sind, wurde in „**Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia spp.*)**“ (siehe Kap. 3.2) eine industriennahe Dreischicht-Spanplatte im Labormaßstab hergestellt. Der Fokus liegt auf der Fragestellung, inwiefern durch den gezielten Einsatz von KS in Deck- oder Mittelschicht Platteneigenschaften positiv beeinflusst werden können. Dieser Ansatz wurde auch aufgrund der noch geringen Verfügbarkeit des Kiriholzes in Deutschland gewählt. Da nach DIN CEN/TS 16368 (2014) Spanplatten mit einer Dichte von unter  $600 \text{ kg m}^{-3}$  als leichte Spanplatten charakterisiert sind und nach Benthien und Ohlmeyer (2018) grundsätzlich aber eine Dichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  als Wert gilt, ab dem Platten als „leicht“ bezeichnet werden, wurde für diese Studie die Plattendichte auf  $500 \text{ kg m}^{-3}$  festgelegt. Hergestellte Varianten waren 100 % KS, 100 % IS, KS in Deckschicht und IS in Mittelschicht und umgekehrt, sowie jeweils KS und IS in der Deckschicht mit einer Mischung von 50 % KS und 50 % IS in der Mittelschicht. Neben Biegefestigkeit, Querkzugfestigkeit, Dickenquellung

und Wasseraufnahme, wurde hier auch der Schraubenauszieh Widerstand getestet und festgestellt, dass durch den Einsatz von KS in der Deckschicht der Schraubenauszieh Widerstand zwar leicht steigt, aber nicht signifikant (siehe Kap. 3.2, Fig. 8). Dennoch kann man festhalten, dass mit einem höheren Gesamtanteil an KS, und damit einem höheren Verdichtungsfaktor, in der Spanplatte der Schraubenauszieh Widerstand steigt. Eckelman (1975) beschreibt, dass die spezifische Dichte ein guter Indikator für Schraubenauszieh Widerstand in Spanplatten ist. Weitere Autoren beschreiben, dass mit steigender Dichte des Materials der Schraubenauszieh Widerstand steigt (Yahya und Abdul-Kader 1998; Pavol et al. 2014). Fujimoto und Mori (1983) zeigen, dass der Schraubenauszieh Widerstand aus der Oberseite und Seite stark mit der Qualität der Verleimung zusammenhängen. Yahya und Abdul-Kader (1998) zeigen, dass die Bindemittelart (MUF und Isocyanat) zwar einen großen Einfluss auf die Querkzugfestigkeit hat, aber der Schraubenauszieh Widerstand nicht mit den Änderungen korrelierte. Beim Vergleich des Schraubenauszieh Widerstandes, sowie aller anderen mechanischen Eigenschaften, wird ein Vorteil der Verwendung von leichten Holzarten für die Produktion von Holzwerkstoffen deutlich: Im Gegensatz zu Kiri-Vollholz (siehe Kap. 4.3), wo eine niedrige Dichte zu geringen mechanischen Eigenschaften führt, führt die geringe Schüttdichte von KS in Spanplatten zu höheren mechanischen Eigenschaften. Die Forschungshypothesen 2-i, 2-ii, 2-iii und 2-iv sind somit verifiziert. Interessant ist dabei, dass beim Einsatz von KS wieder eine verringerte Dickenquellung und Wasseraufnahme festgestellt wurde und die Ergebnisse aus Publikation 1 somit bestätigt.

Forschungshypothese 2-v wird zurückgewiesen. Die Interpretation der Querkzugfestigkeit anhand der Rohdichteprofile führt zur Erkenntnis, dass die Variante mit der geringsten Dichte in der Mittelschicht nicht zwingend auch die geringste Querkzugfestigkeit aufweist, was darauf hindeutet, dass die Querkzugfestigkeit abhängiger von der Verdichtung der Späne und der damit verbundenen verbesserten Adhäsion ist als von der reinen Dichte des Ausgangsmaterials.

In „**The influence of low-density (*Paulownia* spp.) and high-density (*Fagus sylvatica* L.) wood species on various characteristics of light and medium-density three-layered particleboards**“ (siehe Kap. 3.3) wird untersucht, inwiefern eine Holzart mit geringer Dichte und eine Holzart mit hoher Dichte sich in den unterschiedlichen Lagen einer Spanplatte beeinflussen und inwiefern sich, anhand einer Interpretation der Rohdichteprofile, der Verdichtungsgrad der Späne und die effizientere Bindemittelausnutzung bei unterschiedlicher Rohdichte der Spanplatten auf Festigkeitseigenschaften auswirken. Neben der Auswahl von Kiri als Holzart mit geringer Dichte wurde Buche als Holzart mit hoher Dichte ausgewählt, da in Zukunft Absatzmärkte für die erhöhten Buchenanteile (siehe Kap. 1) der deutschen Wälder erschlossen werden müssen. Außerdem ist es wichtig, wie Wimmer et al. (2011) festgehalten haben, dass, gerade aufgrund der Rohstoffverknappung, noch wesentlich stärker auf die möglichen positiven und negativen Effekte durch Holzarten und -qualitäten geachtet werden muss und die Holzwerkstoffindustrie den Vorteil der großen Vielfalt an Holzarten und -qualitäten sehen, erforschen und nutzen sollte. Als Zielrohddichten wurden  $500 \text{ kg m}^{-3}$  und  $650 \text{ kg m}^{-3}$  ausgewählt. Somit liegt bei einer Plattenrohddichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  der Verdichtungsfaktor von Buche bei 0,7, welches von Kawai und Sasaki (1993) als unteres Limit zur Herstellung von Spanplatten angegeben wird, und der von Kiri bei 1,8. Bei einer Plattendichte von  $650 \text{ kg m}^{-3}$  liegt Buche bei 0,9 und Kiri bei 2,4. Für die Biegefestigkeit spielen die effizientere Bindemittelausnutzung (Verdichtungseffekt) vom geringdichten Holz eine größere Rolle als die Ausgangsrohddichte des Holzes (Dichte-Effekt) bei Plattendichten von  $500$  und  $650 \text{ kg m}^{-3}$ . Die Forschungshypothese 3-i ist damit verifiziert. Nach Stegmann et al. (1965)

eignen sich Hölzer mit niedriger Dichte sehr gut um leichte Platten mit hoher Biegefestigkeit herzustellen. Wie Roffael und Dix (1988) berichten, sind dünnwandige Zellfasern leicht verdichtbar und führen, insbesondere in den Deckschichten von Spanplatten, zu hohen Biegefestigkeiten. Während die Ergebnisse aus Publikation 2 (siehe Kap. 3.2, Fig. 3) diese Feststellung unterstützen, können die Ergebnisse aus Publikation 3 (siehe Kap. 3.3, Fig. 1) dies nicht bestätigen, da kein signifikanter Anstieg der Biegefestigkeit durch den Einsatz von KS erzielt wurde. Die Forschungshypothese 3-iii wird zurückgewiesen. Beide Effekte gleichen sich in der Deckschicht aus.

Bezogen auf die Querkzugfestigkeit bei einer Plattendichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  hat der Verdichtungseffekt von KS in der Mittelschicht einen größeren Einfluss als der Dichte-Effekt. Interessant ist, dass bei einer Plattendichte von  $650 \text{ kg m}^{-3}$  keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten mehr zu sehen sind. Das geringdichte Ausgangsmaterial zeigt kleinere prozentuale Veränderungen als das Ausgangsmaterial mit der höheren Dichte. Forschungshypothese 3-iv wird demnach nur für eine Plattendichte von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  verifiziert, da die Erhöhung der Plattendichte von 500 auf  $650 \text{ kg m}^{-3}$  zu einer Verschiebung des vorherrschenden Effektes in Richtung des Dichte-Effektes geführt hat. Ein ähnlicher Trend ist bei der Abhebefestigkeit zu beobachten. Wie oben schon erwähnt, ist die Folgerung, dass, alle Festigkeitseigenschaften betrachtend, beide Effekte in unterschiedlichem Maße wirken. Somit wird Forschungshypothese 3-iv abgelehnt.

Zur Interpretation der Festigkeitseigenschaften mittels Rohdichteprofile von Spanplatten, welche aus unterschiedlichen Rohstoffen hergestellt werden, bleibt festzuhalten, dass immer der Verdichtungsfaktor und die Effizienz der Bindemittelausnutzung berücksichtigt werden müssen. Während die meisten Produktionsparameter in den Versuchen gleich gehalten wurden, um bei Veränderungen Rückschlüsse ziehen zu können, geht mit der Änderung der Holzart ein weiterer Einflussfaktor, die Spangeometrie, einher. Sie wirkt sich ebenso wie die Holzart auf Dichteprofile und Festigkeitseigenschaften aus, wurde aber im Zuge dieser Arbeit nicht untersucht.

Während in Publikationen 1 bis 3 der Bindemittelanteil für die einzelnen Varianten gleich gewählt wurde, wird in der vierten Studie **„Effects caused by admixing of different amounts of kiri particles to low-density spruce particleboards at different adhesive contents”** (siehe Kap. 3.4) der Fokus darauf gelegt, inwiefern der Bindemittelanteil gesenkt und der damit einhergehenden Verringerung an mechanischen Festigkeiten mit KS entgegengewirkt werden kann. Hierfür wurden FS und KS nach gleichem Herstellungsprozess (siehe Kap. 2.2.4) produziert. Die Beleimungsgrade betragen 4, 8 und 12 % und die Zielrohndichte beträgt  $500 \text{ kg m}^{-3}$ . Hergestellt wurden einschichtige Spanplatten in unterschiedlichen Varianten, wobei 100 % KS und 100 % FS als ungemischte Referenzen dienen und Beimischungen von 10, 30 und 50 % KS zu FS untersucht werden. Es ist bereits bekannt, dass die Querkzugfestigkeit bei steigendem Beleimungsgrad steigt (Lehmann 1970; May 1983a; Niemz und Schweitzer 1990). Die Biegefestigkeit steigt ebenfalls, aber nur bis zu einem bestimmten Beleimungsgrad (Kollmann 1955; Lehmann 1970; Niemz und Schweitzer 1990). Forschungshypothese 4-i wird zurückgewiesen, da die Ergebnisse zeigen, dass eine Beimischung von geringen Anteilen an KS zu FS den größten relativen Effekt mit Bezug auf die Biege- und Querkzugfestigkeit hatte. Forschungshypothese 4-ii ist verifiziert, da gezeigt wurde, dass die Erhöhung von KS einen umso geringeren relativen Effekt auf die Festigkeitseigenschaften hatte, je weiter der Bindemittelanteil erhöht wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Plattendichten von  $500 \text{ kg m}^{-3}$  beim vollständigen Austausch von FS durch KS bis zu 30 % Bindemittel eingespart werden kann, ohne Einbußen in Bezug auf die Querkzugfestig-

keit hinnehmen zu müssen. Auf die Biegefestigkeit bezogen, kann sogar bis zu 50 % Bindemittel eingespart werden. Dies lässt schlussfolgern, dass bei einer Plattendichte  $<500 \text{ kg m}^{-3}$  eine größere Menge und  $>500 \text{ kg m}^{-3}$  geringere Mengen an Bindemittel eingespart werden kann. Somit ist Forschungshypothese 4-iii ebenfalls verifiziert. Unter den Bindemitteln, welche in der Holzwerkstoffindustrie verwendet werden, spielen Harnstoff-Formaldehyd-Harze die größte Rolle (Arabi et al. 2011). Obwohl das Bindemittel nur etwa 10 % des Gewichts einer Spanplatte ausmacht, umfassen die Kosten 30 % der gesamten Produktionskosten (Amiri 1998). Das Ergebnis offenbart demnach ein großes Kosteneinsparungspotential mit Bezug auf die Bindemittelkosten. Arabi et al. (2011) haben nachgewiesen, dass der Verringerung der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls durch eine Verringerung des Bindemittelanteils mit Kontrolle des Schlankheitsgrades entgegengewirkt werden kann, jedoch eine Verringerung der Querkraftfestigkeit mit einhergeht.

Wenn in mittlerer Zukunft größere Mengen Kiriholz zur Verfügung stünden, könnte man, wie die Ergebnisse zeigen, große Mengen an Bindemittel einsparen nur durch die Benutzung von Kiri anstatt Fichte als Rohstoff für die Spanplattenindustrie. Einhergehend damit könnten auch die durch den Harnstoff-Formaldehyd-Harz verursachte Formaldehydemission sinken, welche nach Umweltbundesamt (siehe oben) weiterhin ein Problem darstellt. Solange die Verfügbarkeit von Kiriholz weiterhin gering bleibt, kann es für Unternehmen interessant sein, KS in geringen Mengen der Standard-Spanplatte beizumischen, wenn z.B. gewisse Schwellenwerte für Festigkeitseigenschaften nicht erreicht werden. Der dadurch erhöhte Verdichtungsfaktor würde eine Anpassung der Presszeiten notwendig machen.



## 6 SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Mit der Produktion und Entwicklung leichter Plattenwerkstoffe antwortet die Holzwerkstoffindustrie auf die Problematik der Rohstoffverknappung. Hinzu gehört auch der Einsatz von neuen Rohstoffen. Im Zuge dieser Arbeit wurde der Effekt von Dichte auf mechanische und hygrische Eigenschaften von Spanplatten und Massivholz am Beispiel von *Paulownia* untersucht um unter anderem die Tauglichkeit der schnellwachsenden Holzart *Paulownia*, welche eine geringe Dichte aufweist, als Rohstoff für leichte Spanplatten zu evaluieren, sowohl in reiner Form als auch in verschiedenen Mischungsverhältnissen mit anderen Holzarten. Ebenfalls wurde eine Charakterisierung von Kiriholz durchgeführt und es als potenzielles Material für leichte Tischlerplatten evaluiert. Es wurde gezeigt, dass sowohl Kiriholz als auch Kirispäne (KS) vielversprechende Eigenschaften für Holzprodukte mitbringen. In Bezug auf leichte Spanplatten konnten durch den Einsatz von KS alle mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen leichten Spanplatten verbessert werden. Geringe Zumischungen von KS haben sich hier als am effektivsten in Bezug auf die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften gezeigt. Eine weitere Erkenntnis dieser Arbeit war, dass durch den Einsatz von KS große Mengen an Bindemittel eingespart werden können, ohne Verluste in Bezug auf mechanische Eigenschaften hinnehmen zu müssen, und dementsprechend der Formaldehydproblematik aufgrund des Einsatzes von Harnstoff-Formaldehyd-Harzen so weiter entgegengewirkt werden kann.

Ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt sollte nun die Übertragung der Herstellungsprozesse aus dem Labormaßstab auf industrielle Produktionsanlagen sein. KS mit in industrielle Fertigungsprozesse aufzunehmen ist besonders attraktiv für Unternehmen, da nicht mit Umrüstungsinvestitionen zu rechnen ist. Kiriholz bietet zwei Möglichkeiten aktuelle Spanplatten-Produkte weiterzuentwickeln und zu verbessern. Erstens kann ein Hersteller durch den Einsatz von KS eine Reduktion der Plattendichte vornehmen bis hin zu dem Punkt, an dem die Eigenschaften etwa der einer herkömmlichen Spanplatte entsprechen, wodurch bei gleichen Festigkeitseigenschaften weniger Kilogramm Rohstoffe anfallen. Zweitens können bei gleichbleibender Plattendichte durch den Einsatz von KS Eigenschaften gezielt für spezifische Anwendungsfelder angepasst und optimiert werden, z.B. durch Verbesserung der Querkzug- oder Biegefestigkeit oder Bindemittelsparungen ohne Festigkeitsverluste. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeübertragung, bedingt durch den Verdichtungsfaktor, wird jedoch eine Anpassung der Presszeiten erforderlich sein. Da die Möbelindustrie der Hauptabnehmer von Spanplatten ist, sollte in zukünftigen Forschungsstudien eine Evaluierung von Spanplatten mit Deckschicht aus KS in Bezug auf ihre Qualität und Oberflächenbeschaffenheit, sowie gängige Beschichtungen in Form von z.B. HPL (High Pressure Laminate) / CPL (Continuous Pressure Laminate), DPL (Direct Pressed Laminate) oder unterschiedlichen Lacken vorgenommen werden. Weiterhin sollte die chemische Zusammensetzung des Holzes untersucht werden und die Verträglichkeit von Kirispänen mit anderen Klebstoffen, wie MUF (Melamin-Harnstoff-Formaldehyd), PF (Phenol-Formaldehyd) oder pMDI (polymeres Diphenylmethandiisocyanat) getestet werden.

Auch das Zusammenspiel zwischen Hölzern mit geringer und hoher Dichte sollte weiterhin untersucht werden, z.B. um die Frage zu klären, ob Späne unterschiedlicher Holzarten bei verschiedenen Verdichtungsfaktoren zu gleichen relativen Anstiegen der Festigkeitseigenschaften führen und wie



sich Mischungsverhältnisse unterschiedlicher Holzarten und verschiedene Bindemittel verhalten. Interessant wäre auch zu wissen, wo sich der optimale Verdichtungsfaktor in Abhängigkeit der Plattendichte für bestimmte Holzarten befindet um somit anhand dieser Werte eine vom Verdichtungsfaktor ideal an die Nutzung angepasste Spanplatte zu erzeugen. Ein weiterer wichtiger Ansatz wäre es, die Unterschiede der Wärmeübertragung im Heißpressvorgang bis in die Mitte der Platte von Holzarten mit geringer und hoher Dichte zu untersuchen.

Zum besseren Verständnis des Verhaltens von Kiriholz gegenüber holzerstörenden Pilzen sollte erneut die Dauerhaftigkeit und zusätzlich der Extraktstoffgehalt verschiedener Arten untersucht werden. Aufgrund der Einstufung in Dauerhaftigkeitsklasse 5 (unter Vorbehalt) in Bezug auf Weiß- und Moderfäule ergibt es Sinn, die Imprägnierbarkeit von Kiriholz zu untersuchen um somit die Dauerhaftigkeit zu erhöhen. Da Kiri eine sehr schnellwachsende Holzart ist, können auch Untersuchungen zur Verdichtung von Kiriholz zur Erhöhung der Festigkeitseigenschaften und Härte sehr interessant sein. Forschungen zu Sperrhölzern komplett aus Kiriholz mit harten Oberflächenbeschichtungen oder in Kombination mit anderen härteren Holzarten als Deckschichten könnten, ähnlich den Tischlerplatten, auch hier vielversprechende Holzprodukte hervorbringen.

Sowohl für Holzprodukte aus Vollholz als auch in Form von Holzwerkstoffen sind die Schnellwüchsigkeit und die damit zusammenhängende geringe Dichte die vorteilhaftesten Eigenschaften von Kiriholz. Es ist überall da interessant, wo durch Gewichtseinsparungen Vorteile entstehen.

## 7 REFERENZEN

- AKCAY C, BIRINCI E, BIRINCI C, KOLAYLI S (2020) Durability of wood treated with propolis. *Bioresources* **15** (1), S. 1547–1562
- AKHTARI M, TAGHIYARI HR, GHORBANI KOKANDEH M (2013) Effect of some metal nanoparticles on the spectroscopy analysis of *Paulownia* wood exposed to white-rot fungus. *Eur. J. Wood Prod.* **71**, S. 283–285
- AKHTARI M, AREFKHANI M (2013) Study of microscopy properties of wood impregnated with nanoparticles during exposed to white-rot fungus. *Agric. Sci. Dev.* **2** (11), S. 116–119
- AKHTARI M, GANJIPOUR M (2013) Effect of Nano-silver and Nano-Copper and Nano-zinc oxide on *Paulownia* wood exposed to white-rot fungus. *Proceedings of the 44<sup>th</sup> IRG Annual Meeting*, IRG/WP 13-30635, Stockholm
- AKYILDIZ MH, KOL HS (2010) Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.). *J. Environ. Biol.* **31** (3), S. 351–355
- ALFTER D, KNAUF M, LÜDTKE J, MAACK C (2018) *Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0* (3. Auflage). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Referat 535, Bonn, 58 S.
- AMIRI S (1998) Economic investigation of particleboard plants. *Iranian Journal of Natural Resource* **51**, S. 25–35
- ARABI M, FAEZIPOUR M, GHOLIZADEH H (2011) Reducing resin content and board density without adversely affecting the mechanical properties of particleboard through controlling particle size. *J. For. Res.* **22** (4), S. 659–664
- BALDUCCI F, HARPER C, MEINLSCHMIDT P, DIX B, SANASI A (2008) Development of Innovative Particleboard Panels. *Drv. Ind.* **59**, S. 131–136
- BARTON IL, NICHOLAS ID, ECROYD CE (2007) *Paulownia*. *For. Res. Bull. No.* **231**, 71 S.
- BÄRWOLFF M, HANSEN H, HOFMANN M, SETZER F (2012) *Energieholz aus der Landwirtschaft*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow-Prüzen, 56 S.
- BEKTAS I, GULER C, KALAYCIOGLU H, MENGELOGLU F, NACAR M (2005) The manufacture of particleboards using sunflower stalks (*Helianthus annuus* L.) and poplar wood (*Populus alba* L.). *J. Compos. Mater.* **39**, S. 467–473
- BENTHIEN JT, OHLMEYER M (2018) *Entwicklung leichter Holzwerkstoffe unter Anwendung definierter Spanorientierung und Partikelmorphologie - Schlussbericht zum Teilvorhaben 1*. Thünen Working Paper 94, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 34 S.
- BOEHME C (1986) Einfluss des Dichteprofiles auf die Dickenquellung von Spanplatten. *WKI-Kurzbericht* **29/86**

- BOEHME C (1991) Rohdichteprofil und Dickenquellung von Spanplatten. *Holz-Zentralblatt* **117**, S. 1984
- BOOKER RE (1996) The reasons for the microfibril orientations in the tracheid cell walls of trees. *Recent Advances in Wood Anatomy - Proceedings of the third pacific regional wood anatomy conference*, Rotorua, S. 273–282
- BUCHHOLZER P (1992) Eignung von Pappelindustrieholz unterschiedlicher Klone, Altersstufen und Standorte für die Spanplattenherstellung. *Holz-Zentralblatt* **118**, S. 165–168
- BURNETT MP, KHARAZIPOUR A (2018) Mechanical behaviour of a lightweight, three-layered sandwich panel based on the raw material maize. *Holzforschung* **72**, S. 65–70
- BURNETT-BARKING M (2016) *Entwicklung von leichten, dreischichtigen Sandwichverbundplatten unter Verwendung des Agrarrohstoffes Mais*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 141 S.
- BUTTERFIELD B (2006) The structure of wood: form and function. In: Walker JC (Hrsg.) *Primary wood processing: principles and practice* (2. Auflage). Springer, Dordrecht, S. 1–22
- BWALDG (2020) Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz). §2 Absatz 2 Satz 1. Aufgerufen am 19.07.2020, verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html>
- BWI (2014) *Der Wald in Deutschland, Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 52 S.
- CARLOWITZ HCv (1713) *Sylvicultura oeconomica: oder haußwirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht* (Hrsg. Hamberger J in 2013). Oekom, München, 638 S.
- CLAD W (1982) Die Rohdichtesenkung bei Spanplatten - Eine Literaturübersicht. *Holz Roh- Werkst.* **40**, S. 387–393
- CLAD W, POMMER EH (1980) Particleboard from Kiri (*Paulownia tomentosa*, Fam. Scrophulariaceae). *Holz Roh- Werkst.* **38**, S. 385–391
- CLEMENT TP (2014) Authorship matrix: a rational approach to quantify individual contributions and responsibilities in multi-author scientific articles. *Sci. Eng. Ethics* **20**, S. 345–361
- ÇÖPÜR Y, GÜLER C, AKGÜL M, TAŞÇIOĞLU C (2007) Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production. *Build. Environ.* **42**, S. 2568–2572
- CORBETT N (1965) Micro-morphological studies on the degradation of lignified cell walls by Ascomycetes and fungi imperfecti. *J. Inst. Wood Sci.* **14**, **2** (2), S. 18–29
- DEPPE H (1968) Holzspan-Schaumstoff-Verbundplatten für das Bauwesen. *Holz-Zentralblatt* **86**, S. 1249–1253
- DEPPE HJ, ERNST K (2000) *Taschenbuch der Spanplattentechnik* (4. überarbeitete und erweiterte Auflage). DRW, Leinfelden-Echterdingen, 552 S.

- DIN 52182 (1976) *Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52183 (1977) *Prüfung von Holz; Bestimmung des Feuchtegehaltes*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52184 (1979) *Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52185 (1976) *Prüfung von Holz; Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52186 (1978) *Prüfung von Holz; Biegeversuch*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52188 (1979) *Prüfung von Holz; Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN 52189-1 (1981) *Prüfung von Holz; Schlagbiegeversuch; Bestimmung der Bruchschlagarbeit*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN CEN/TS 15083-1 (2005) *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzerstörende Pilze, Prüfverfahren - Teil 1: Basidiomyceten; Deutsche Fassung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN CEN/TS 15083-2 (2005) *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Bestimmung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Vollholz gegen holzerstörende Pilze, Prüfverfahren - Teil 2: Moderfäulepilze; Deutsche Fassung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIN CEN/TS 16368 (2014) *Leichte Spanplatten - Anforderungen; Deutsche Fassung*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin
- DIX B, MEINLSCHMIDT P, FLIERDT A VAN DE, THOLE V (2009) Leichte Spanplatten für den Möbelbau aus Rückständen der landwirtschaftlichen Produktion. Teil 3. Mechanische und physikalische Eigenschaften der Spanplatte. *Holztechnologie* **50**, S. 5–11
- DUNKY M, NIEMZ P (2002) *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*. Springer, Berlin (u.a.), 954 S.
- DUNKY M, PIZZI A (2002) Wood Adhesives. In: Dillard DA, Pocius AV (Hrsg.) *Adhesion Science and Engineering. Volume 2: Issue Surfaces, Chemistry and Applications*. Elsevier, Amsterdam, S. 1039–1103
- DUNKY M, LEDERER K, ZIMMER E (1981) Einfluss der Molgewichtsverteilung des Harnstoff-Formaldehyd-Harzes auf die technologischen Eigenschaften hiermit verleimter Spanplatten. *Holzforsch. Holzverwert.* **33** (4), S. 61–71
- EN 113 (1996) *Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten; Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit; Deutsche Fassung*. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Belgien

- EN 320 (2011) *Spanplatten und Faserplatten - Bestimmung des achsenparallelen Schraubenausziehewiderstands; Deutsche Fassung*. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Belgien
- EN 1534 (2010) *Holzfußböden - Bestimmung des Eindruckwiderstands - Prüfmethode; Deutsche Fassung*. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Belgien
- EN 13986 (2015) *Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung; Deutsche Fassung*. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Belgien
- EPF (2019) European Panel Federation stats show wood-based panel production declined in 2019. Aufgerufen am 17.07.2020, verfügbar unter <https://www.wbpionline.com/features/the-epf-is-ready-for-the-future-6853829/>
- ECKELMAN CA (1975) Screwholding performance in hardwoods and particleboard. *For. Prod. J.* **25** (6), S. 30–35
- ERIKSSON KEL, BLANCHETTE R, ANDER P (1990) *Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components*. Springer, Berlin (u.a.), 407 S.
- ERNST K (1967) Möglichkeiten zur Verminderung der Quellung bei Spanplatten. *Holztechnologie* **8**, S. 41–47
- FAIX O (2012) Chemie des Holzes. In: Wagenführ A, Scholz F (Hrsg.) *Taschenbuch der Holztechnik* (2. Auflage). Carl Hanser, München, S. 47–74
- FAO (1958) *Fiberboard and Particle Board: Report of an International Consultation on Insulation Board, Hardboard and Particle Board*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 179 S.
- FLYNN JH, HOLDER CD (2001) *A guide to useful woods of the world* (2. Auflage). Forest Products Society, Madison, Wis., 618 S.
- FUJIMOTO Y, MORI M (1983) Performance of wood screw joints for particleboard. *Sci. Bull. Fac. Agric.* **30** (1), S. 45–47
- GARAY RM, MACDONALD F, ACEVEDO ML, CALDERÓN B, ARAYA JE (2009) Crop residue use in particleboard. *Bioresources* **4**, S. 1396–1408
- GATCHELL CJ, HEEBINK BG, HEFTY FV (1966) Influence of component variables on properties of particleboard for exterior use. *For. Prod. J.* **16** (4), S. 46–59
- GHOORBANI M, ASGHARI H (2016) Effect of different concentration of furfurylation on physical properties and decay resistance of *Paulownia* wood. *Proceedings of 47<sup>th</sup> IRG Annual Meeting*, IRG/WP 16-40762, Lisbon
- GRIGORIOU A (1981) Der Einfluss verschiedener Holzarten auf die Eigenschaften dreischichtiger Spanplatten und deren Deckschichten. *Holz Roh- Werkst.* **39**, S. 97–105
- HABENICHT G (2014) *Kleben – erfolgreich und fehlerfrei* (6. Überarbeitete und ergänzte Auflage). Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 205 S.

- HABENICHT G (1997) *Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen* (3. Neubearb. und erw. Auflage). Springer, Berlin (u.a.), 893 S.
- HANN RA, BLACK JM, BLOMQUIST RF (1963) How durable is particleboard? Part II. The effect of temperature and humidity. *For. Prod. J.* **13**, S. 169–174
- HAPLA F, MILITZ H (2008) Verwertung und Verwendung von Buchenholz. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) *Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche, Beiträge aus der NW-FVA* (Band 3). Univ.-Verl. Göttingen, Göttingen, S. 311–325
- HASSAN B, AHMED S, KIRKER G, MANKOWSKI ME, MISBAH-UL-HAQ M (2018) Antioxidant effects of four heartwood extractives on midgut enzyme activity in *Heterotermes indicola* (Blattodea: Rhinotermitidae). *Environ. Entomol.* **47**, S. 741–748
- HE T, VAIDYA BN, PERRY ZD, PARAJULI P, JOSHEE N (2016) *Paulownia* as a medicinal tree: traditional uses and current advances. *Eur. J. Med. Plants.* **14** (1), S. 1–15
- HEGAZY SS, AREF IM (2010) Suitability of some fast-growing trees and date palm fronds for particleboard production. *For. Prod. J.* **60** (7/8), S. 599–604
- HIGUCHI M, SAKATA I (1979) Studies on the improvement of urea-formaldehyde resins adhesives. 1: A possibility of water resistance improvement. *Mokuzai Gakkaishi* **25**, S. 496–502
- HILL CAS (2006) *Wood modification: chemical, thermal and other processes* (1. Auflage). Wiley, Chichester (u.a.), 239 S.
- HIMMELHEBER M, HAGEN G, FROEDE O (1956) *Verfahren zur Herstellung von Spanplatten und Spanholzkörpern vornehmlich niedrigen spezifischen Gewichtes*. DE000001147745B, Deutsches Patentamt
- HORN V, BENNDORF G, RÄDLER KP (1978) Strukturgruppenanalyse von Harnstoff-Formaldehyd-Leimen. *Plaste Kautsch.* **25** (10), S. 570–575
- HU SY (1961) The economic botany of the paulownias. *Econ. Bot.* **15**, S. 11–27
- HÜLSTA (2020) Hülsta - Die Möbelmarke. Broschüre: Madera. Wohnen. Aufgerufen am 11.08.2020, verfügbar unter [https://info-service.hulsta.com/media/pdf/04/e2/7e/huelsta\\_Broschuere\\_MADERA\\_Wohnen\\_D\\_INT.pdf](https://info-service.hulsta.com/media/pdf/04/e2/7e/huelsta_Broschuere_MADERA_Wohnen_D_INT.pdf)
- KALAYCIOGLU H, DENIZ I, HIZIROGLU S (2005) Some of the properties of particleboard made from *Paulownia*. *J. Wood. Sci.* **51**, S. 410–414
- KAWAI S, SASAKI H (1993) Low-density particleboard. In: Shiraishi N (Hrsg.) *Recent research on wood and wood-based materials (Vol. 11)*. Elsevier, London (u.a.), S. 33–41
- KEHR E, JENSEN U (1975) Zur Entwicklung der Eigenschaften von Spanplatten für den Möbelbau. *Holztechnologie* **16**, S. 161–170
- KEHR E, SCHILLING W (1965) 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** (4), S. 225–232
- KELLY MW (1977) *Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard*. General Technical Report FPL-10, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 65 S.
- KEYLWERTH R (1958) Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte. *Holz Roh- und Werkst.* **16**, S. 419–430
- KIRKER GT, BLODGETT AB, LEBOW PK, CLAUSEN CA (2012) Above ground evaluation and GC-MS analysis of naturally durable wood species. *Proceedings of the 43<sup>rd</sup> IRG Annual Meeting*, IRG/WP 12-10764, Kuala Lumpur
- KIRKER GT, BLODGETT AB, ARANGO RA, LEBOW PK, CLAUSEN CA (2013a) The role of extractives in naturally durable wood species. *Int. Biodeterior. Biodegradation* **82**, S. 53–58
- KIRKER GT, BLODGETT AB, LEBOW PK, CLAUSEN CA (2013b) Transferable Durability: Enhancing decay resistance of non-durable species with extractives from durable wood species. *Proceedings of the 44<sup>th</sup> IRG Annual Meeting*, IRG/WP 13-10808, Stockholm
- KLAUDITZ W, ULBRICHT HJ, KRATZ W (1958) Über die Herstellung und Eigenschaften leichter Holzspanplatten. *Holz Roh- Werkst.* **16**, S. 459–466
- KNAUF M, FRÜHWALD A (2015) The future development of the German wood-based panel industry. *Holztechnologie* **56**, S. 5–12
- KOLLMANN F (1966) *Holzspanwerkstoffe: Holzspanplatten und Holzspanformlinge Rohstoffe, Herstellung, Plankosten Qualitätskontrolle usw.*. Springer, Berlin (u.a.), 821 S.
- KOLLMANN F, SCHNÜLLE F, SCHULTE K (1955) Untersuchungen zur Beileimung von Spangemischen. *Holz Roh- und Werkst.* **13**, S. 440–449
- KOLLMANN F (1951a) Anatomie und Pathologie des Holzes. In: Kollmann F (Hrsg.) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2. Auflage). Springer, Berlin (u.a.), S. 1–109
- KOLLMANN F (1951b) Chemie des Holzes. In: Kollmann F (Hrsg.) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe* (2. Auflage). Springer, Berlin (u.a.), S. 109–327
- KOMAN S, FEHER S, VITYI A (2017) Physical and mechanical properties of *Paulownia tomentosa* wood planted in Hungaria. *Wood Res.* **62** (2), S. 335–440
- KRUSE K, BRÖKER FW, FRÜHWALD A (1996) Zusammenhang zwischen Querszugfestigkeit, Rohdichteprofil und Ultraschallgeschwindigkeit von Spanplatten. *Holz Roh- und Werkst.* **54**, S. 295–300
- LEHMANN WF (1970) Resin efficiency in particleboard as influenced by density, atomization and resin content. *For. Prod. J.* **20** (11), S. 48–54

- LENGYEL K, BARBU C, CAMPEAN M, BADIN N, BEDELEAN B (2018) Improving properties of particleboards with reduced density. *Bioresources* **13**, S. 1289–1302
- LOHMANN U, BLOSEN M (2010) *Holzlexikon* (4. Auflage). Nikol, Hamburg, 1423 S.
- MACPEAK MD, BURKHART LF, WELDON D (1987) A mill study of the quality, yield, and mechanical properties of plywood produced from fast grown loblolly pine. *For. Prod. J.* **37** (2), S. 51–56
- MALONEY TM (1993) *Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing* (updated edition). Miller Freeman, San Francisco, 681 S.
- MANTAU U (2012) *Holzrohstoffbilanz Deutschland: Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015*. Universität Hamburg, 65 S.
- MARRA AA (1992) *Technology of wood bonding: principles in practice*. Springer, New York (u.a.), 454 S.
- MARUTZKY R, SAUERWEIN P (2009) *Spezial Span- und Faserplatten, OSB*. Informationsdienst Holz. Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig, 47 S.
- MARUTZKY R, SAUERWEIN P (2008) *Spezial Sperrholz*. Informationsdienst Holz. Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig, 43 S.
- MAY HA, ROFFAEL E (1982) Wie wird das Eindringen von Wasser in Spanplatten vom Dichteprofil beeinflusst? *WKL-Kurzbericht* **26/82**
- MAY HA (1983a) Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 4: Einflüsse der Dichteunterschiede und Rohstoffe auf die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene und die Scherfestigkeit. *Holz Roh- und Werkst.* **41**, S. 271–275
- MAY HA (1983b) Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 5: Einflüsse der Dichteunterschiede und Rohstoffe auf Biege-E-Modul und Biegefestigkeit. *Holz Roh- und Werkst.* **41**, S. 369–374
- MEIER E (2015) Wood! Identifying and using hundreds of woods worldwide. The Wood Database, 272 S.
- MESSNER K, FACKER K, LAMAIPIS P, GINDL W, SREBOTNIK E, WATANABE E (2003) Overview of white-rot research: where we are today. In: Goodell B, Nicholas DD, Schultz TP (Hrsg.) *Wood deterioration and preservation: advances in our changing world*. American Chemical Society Publication, Washington DC, S. 73–96
- MONTEIRO S, MARTINS J, MAGALHÃES FD, CARVALHO L (2016) Low density wood-based particleboards bonded with foamable sour cassava starch: preliminary studies. *Polymers* **8** (10), **354**
- NELIS PA (2014) *Effect of size on tensile, compression and bending strengths of six European hardwood species*. Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Göttingen, S. 122



- NEMLI G, DEMIREL S (2007) Relationship between the density profile and the technological properties of the particleboard composite. *J. Compos. Mater.* **41**, S. 1793–1802
- NEUSSER H, ZENTNER M (1974) Vergleichsuntersuchung der wichtigsten heimischen Holzarten hinsichtlich ihrer Eignung für die Spanplattenindustrie. *Holzforsch. Holzverwert.* **26**, S. 54–63
- NEUSSER H, KRAMES U, HAIDINGER K (1965) Das Verhalten von Spanplatten gegenüber Feuchtigkeit unter besonderer Berücksichtigung der Quellung. *Holzforsch. Holzverwert.* Teil 1. **17**, S. 43–53, Teil 2. **17**, S. 57–69
- NEUSSER H, KRAMES U, KERN F (1960) Über das Verhalten von Spanplatten in Wasser. *Holzforsch. Holzverwert.* **12** (6), S. 98–107
- NIEMZ P, SONDEREGGER WU (2017) *Holzphysik - Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Carl Hanser, München, 580 S.
- NIEMZ P, BAUER S (1991) Beziehungen zwischen Struktur und Eigenschaften von Spanplatten. Teil 2: Schubmodul, Scherfestigkeit, Biegefestigkeit, Korrelation der Eigenschaften untereinander. *Holzforsch. Holzverwert.* **43**, S. 68–70
- NIEMZ P, SCHWEITZER F (1990) Einfluss ausgewählter Strukturparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit von Spanplatten. *Holz Roh- Werkst.* **48**, S. 361–364
- NILSSON T (1973) Studies on wood degradation and cellulotic activity of microfungi. *Stud. For. Suecica* **104**
- OBERDORFER G (2008) Formaldehydemissionen aus Holzwerkstoffen. *Holzforschung* **4**, S. 8–9
- OLMSTEAD R, ZJHRA M, LOHMANN LG, GROSE SO, ECKERT AJ (2009) A molecular phylogeny and classification of Bignoniaceae. *Am. J. Bot.* **96**, S. 1731–1743
- OLSON JR, CARPENTER SB (1985) Specific gravity, fiber length, and extractive content of young *Paulownia*. *Wood and Fiber Sci.* **17** (4), S. 428–438
- PARAMESWARAN N, ROFFAEL E (1982) Mikrotechnologische Untersuchungen an verdichteten Holzspänen im Spanplattenverbund. *Adhäsion* **26** (6/7), S. 8–14
- PAULITSCH M, BARBU MC (2015) *Holzwerkstoffe der Moderne*. DRW, Leinfelden-Echterdingen, 524 S.
- PAVOL J, NADEŽDA N, MARTIN T (2014) Withdrawal resistance of wood screw in wood-based materials. *Forestry and Wood Technology* **87**, S. 90–96
- PETERSEN H, REUTHER W, EISELE W WITTMANN O (1974) Zur Formaldehyd-Abspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln. 3. Mitteilung: Der Einfluss von Härterart, Härtermenge und formaldehydbindenden Mitteln. *Holz Roh- Werkst.* **32**, S. 402–410
- PETERSEN H, REUTHER W, EISELE W WITTMANN O (1973) Zur Formaldehyd-Abspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln. 2. Mitteilung: Der

- Einfluss von Festharzmenge, Presszeit und Presstemperatur. *Holz Roh- Werkst.* **31**, S. 463–469
- PETERSEN H, REUTHER W, EISELE W WITTMANN O (1972) Zur Formaldehyd-Abspaltung bei der Spanplattenerzeugung mit Harnstoff-Formaldehyd-Bindemitteln. *Holz Roh- Werkst.* **30**, S. 429–436
- PLATH E (1963) Einfluss der Rohdichte auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen. *Holz Roh- Werkst.* **21**, S. 104–108
- PLATH E, SCHNITZLER E (1974) Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten. *Holz Roh- Werkst.* **32**, S. 443–449
- POBLETE H (1992) Einfluss der Holzart und der Holzartenmischung auf die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten bei Verwendung chilenischer Hölzer. *Holz Roh- und Werkst.* **50**, S. 392–394
- POHLEVEN F, PETRIC M (1997) Resistance of the wood of *Eucalyptus saligna* and *Paulownia tomentosa* against some wood rotting fungi. *Proceedings of the 28<sup>th</sup> IRG Annual Meeting*, IRG/WP 97-10238, Whistler
- POPPENSIEKER J, THÖMEN H (2005) Wabenplatten für den Möbelbau. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Arbeitsbericht des Instituts für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes. Universität Hamburg, 103 S.
- RAGON KW, NICHOLAS DD, SCHULTZ TP (2008) Termite-resistant heartwood: effect of the non-biocidal antioxidant properties of the extractives (Isoptera: Rhinotermitidae). *Sociobiology* **52**, S. 47–54
- RAHMAN WMNWA, TAMAT NSM, KASIM J (2019) The suitability of fast growing tree species for particleboard production. *International Journal of Recent Technology and Engineering* **8** (1), S. 3156–3161
- RANTA L, MAY HA (1978) Zur Messung von Rohdichteprofilen an Spanplatten mittels Gammastrahlen. *Holz Roh- Werkst.* **36**, S. 467–474
- REIN JJ (1889) *The Industries of Japan. Together with an account of its agriculture, forestry, arts and commerce*. Armstrong and Son, New York, 570 S.
- RICHTER C (2015) *Wood characteristics: description, causes, prevention, impact on use and technological adaption* (Corrected printing). Springer, Cham (u.a.), 222 S.
- RITTER N (2012) *Entwicklung leichter, dreischichtiger Spanplatten aus seiner Kombination der nachwachsenden Rohstoffe Mais und Holz*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Sierke, 206 S.
- ROFFAEL E (1999) Was Holzwerkstoffe „im innersten zusammenhält“. Wechselwirkungen zwischen Holz bzw. den Lignocellulosen und den Bindemitteln bisher nur wenig bekannt. *Holz-Zentralblatt* **125** (142), S. 35–36

- ROFFAEL E, DIX B (1988) Zur Bedeutung von schnellwüchsigen Baumarten als Rohmaterial für die Holzwerkstoffherstellung unter besonderer Berücksichtigung von Pappelholz für Spanplatten. *Holz Roh- und Werkst.* **46**, S. 245–252
- ROFFAEL E, RAUCH W (1972) Einfluss der Rohdichte auf das Quellungsverhalten von phenolharzgebundenen Spanplatten. *Holz Roh- und Werkst.* **30**, S. 178–181
- ROFII MN, YUMIGETA S, KOJIMA Y, SUZUKI S (2013) Effect of furnish type and high-density raw material from mill residues on properties of particleboard panels. *J. Wood Sci.* **59**, S. 402–409
- ROWELL RM (2005) Cell wall chemistry. In: Rowell RM (Hrsg.) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, Boca Raton, Florida, S. 35–74
- SAVORY JG (1954) Breakdown of timber by ascomycetes and fungi imperfecti. *Ann. Appl. Biol.* **41**, S. 336–347
- SCATOLINO MV, SILVA DW, MENDES RF, MENDES LM (2013) Use of maize cob for production of particleboard. *Ciênc. Agrotec.* **37** (4), S. 330–337
- SCHEFFER TC, COWLING EB (1966) Natural resistance of wood to microbial deterioration. *Annual Review of Phytopathology* **4**, S. 147–168
- SCHMIDT O (2006) *Wood and Tree Fungi: Biology, Damage, Protection, and Use*. Springer, Berlin (u.a.), 334 S.
- SCHNEIDEROVÁ K, ŠMEJKAL K (2015) Phytochemical profile of *Paulownia tomentosa* (Thunb). *Stud. Phytochem. Rev.* **14**, S. 799–833
- SCHULTE M, FRÜHWALD A (1996) Schubmodul, Querzugfestigkeit und Dichteprofil von mitteldichten Faserplatten. *Holz Roh- und Werkst.* **54**, S. 49–55
- SCHWARZE F, ENGELS J, MATTHECK C (2011) *Holzersetzung Pilze in Bäumen: Strategien der Holzersetzung* (2. Auflage). Rombach, Freiburg im Breisgau, 245 S.
- SHALBAFAN A (2013) *Investigation of foam materials to be used in lightweight wood-based composites*. Dissertation, Universität Hamburg, 203 S.
- SHALBAFAN A, TACKMANN O, WELLING J (2016) Using of expandable fillers to produce low density particleboard. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **74**, S. 15–22
- SMITH I, LANDIS E, GONG M (2003) *Fracture and Fatigue in Wood*. Wiley, West Sussex, 242 S.
- STATISTA (2020) Erzeugung von Spanplatten in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2018 (in 1.000 Kubikmeter). Aufgerufen am 26.07.2020, verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/158562/umfrage/erzeugung-von-spanplatten-in-deutschland-seit-2005/>
- STAMM AJ (1964) *Wood and Cellulose Science*. Ronald, New York, 549 S.
- STEARNS JL (1944) *Paulownia* as a tree of commerce. *Am. For.* **52** (2), S. 60–61 u. S. 95–96

- STEGMANN G, DURST J, KRATZ W (1965) Pappelschichtholz als Rohstoff der Spanplattenindustrie. *Holzforsch. Holzverwert.* **17**, S. 37–43
- STEWART HA, LEHMANN WF (1973) High-quality particleboard from cross-grain, knife-planed hardwood flakes. *For. Prod. J.* **23** (8), S. 52–60
- STINGLWAGNER G, HASEDER I, ERLBECK R (2005) *Das Kosmos Wald- und Forstlexikon* (3. Auflage). Kosmos, Stuttgart, 1022 S.
- STOSCH M (2004) Die Anbauwand das Fliegen lehren. In: Design und Konstruktion von Leichtbaumöbeln. 10. Jowat-Symposium
- UBA (2015) Formaldehyd. Aufgerufen am 13.08.2020, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/formaldehyd#formaldehyd-neue-einstufung-durch-die-eu>
- UBA (2020) Formaldehydemissionen: Prüfbedingungen für Holzwerkstoffe. Aufgerufen am 13.08.2020, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/studien-zur-messung-bewertung-von-schadstoffen/formaldehydemissionen-pruefbedingungen-fuer>
- VHI (2020) Verband der deutschen Holzwerkstoffindustrie e.V.. Aufgerufen am 26.06.20, verfügbar unter <https://vhi.de/holzwerkstoffe/spanplatte/>
- VITAL BR, LEHMANN WF, BOONE RS (1974) How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. *For. Prod. J.* **24** (12), S. 37–45
- WAGENFÜHR R (1999) *Anatomie des Holzes: Strukturanalytik, Identifizierung, Nomenklatur, Mikrotechnologie* (5. Auflage). DRW, Leinfelden-Echterdingen, 188 S.
- WAGENFÜHR R, WAGENFÜHR A (2012) Anatomie des Holzes. In: Wagenführ A, Scholz F (Hrsg.) *Taschenbuch der Holztechnik* (1. Auflage). Carl Hanser, München, S. 14–47
- WAGNER B (1997) *Untersuchungen zur Formaldehydabgabe von Holz und Aminoplastharz gebundenem Buchensperrholz*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Cuvillier, 232 S.
- WALKER JC (2006) *Primary wood processing: principles and practice* (2. Auflage). Springer, Dordrecht, 596 S.
- WANG K, LAM F (1999) Quadratic RSM models of processing for a three-layer oriented flakeboard. *Wood Fiber Sci.* **31** (2), S. 173–186
- WEGROW (2020) Unser Kiri-Holz. Aufgerufen am 11.08.2020, verfügbar unter <https://www.wegrow.de/kiri/>
- WEIGL M, WIMMER R, LEDER S, HARM M (2008) Achieving lower density for particle boards by means of raw material selection. In: *Lightweight Wood-Based Composites: Production, Properties and Usage - Proceedings of the COST E49 International Workshop*, Llandudno, S. 67–80

- WEIMAR H, DÖRING P, MANTAU U (2012) *Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring. Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011*. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft, Hamburg
- WIEDENHOEFT AC, MILLER RB (2005) Structure and Function of Wood. In: Rowell RM (Hrsg.) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. CRC Press, Boca Raton, Florida, S. 9–33
- WIMMER R, WEIGL M, SCHÖNEBERG S (2011) Effects of Wood-Resources on Selected Particleboard Properties. *Proceedings of the Joint International Symposium on Wood Composites & Veneer Processing and Products*, S. 337–344
- WITKAVEL A (2004) *Beiträge zur Beurteilung der Formaldehydabgabe von Holzspan- und mitteldichten Faserplatten (MDF) im niedrigen Formaldehydabgabebereich*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Sierke, 160 S.
- WONG ED, ZHANG M, WANG Q, KAWAI S (1999) Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Sci. Technol.* **33**, S. 327–340
- WYSS O (1981) Zur Patentgeschichte der Spanplatte. *Holz Roh- Werkst.* **39**, S. 399–404
- YADAV NK, VAIDYA BN, HENDERSON K, LEE JF, STEWART WM, DHEKNEY SA, JOSHEE N (2013) A review of *Paulownia* biotechnology: A short rotation, fast growing multipurpose bioenergy tree. *Am. J. Plant Sci.* **4**, S. 2070–2082
- YAYHA SN, ABDUL-KADER R (1998) Properties of particleboard manufactured from less used species I: *Anthocephalus chinensis*. In: Hse CY, Branham SJ, Chou C (Hrsg.) *Adhesive Technology and Bonded Tropical Products*. Taiwan Forestry Research Institute Extension Series No. **96**, S. 431–437
- ZHU ZH, CHAO CJ, LU XY, XIONG YG (1986) *Paulownia in China: Cultivation and Utilization*. Asian Network for Biological Sciences (ANBS) and International Development Research Centre (IDRC), Singapore, 65 S.
- ZIMMERMANN T, SELL J (1997) *Das Feingefüge der Zellwand auf Querbruchflächen von längszugbeanspruchten Laubhölzern*. Forschungs- und Arbeitsbericht 115/35, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Holz, Dübendorf

## 8 DANKSAGUNG

Alle Forschungsstudien entstanden im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit in der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte an der Georg-August-Universität Göttingen in Kooperation mit der Firma WeGrow GmbH. Zuerst möchte ich mich bei Herrn **Prof. Dr. Carsten Mai** bedanken für seine Führung und Hilfe in Bezug auf meine wissenschaftliche Tätigkeit, die fachliche Kompetenz und eine immer offene Tür, durch welche eine sehr direkte Kommunikation zu allen Zeiten möglich gewesen ist. Herrn **Peter Diessenbacher**, Gründer und Geschäftsführer der Firma WeGrow GmbH, möchte ich danken für seine Unterstützung, den fachlichen Austausch und die unkomplizierte Zusammenarbeit. Bei Herrn **Prof. Dr. Holger Militz** und Herrn **Prof. Dr. Kai Zhang** möchte ich mich für die Führung der Abteilungen, Bereitstellung der Infrastruktur und Organisation horizonterweiternder Exkursionen bedanken. Herrn **Prof. Dr. Alireza Kharazipour** möchte ich danken für die Bereitstellung des Technikums der AG Chemie und Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen. Nach Beendigung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit in der Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte Ende 2018, hat aufgrund des Starts eines neuen Lebensabschnitts die Arbeit an der Promotion für ein Jahr pausiert. Es war Herr **Prof. Dr. Dirk Jaeger**, Leiter der Abteilung Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie, welcher mich in einer schwierigen Phase mit wohlwollenden Rahmenbedingungen unterstützt und mit neuer Motivation erfüllt hat, die schon fortgeschrittene Promotion nun zu einem erfolgreichen Ende zu bringen.

Ich möchte mich auch bei den technischen Mitarbeitern **Dieter, Simon, Petra, Mirko** und **Bernd** für eine stetige und schnelle Unterstützung in allen technischen Belangen bedanken. Es hat mir immer Spaß gemacht mit euch zusammenzuarbeiten und von euch zu lernen. Das Herz und die Seele der Abteilung ist die langjährige Sekretärin Frau **Brigitte Junge** – danke für Ihre Professionalität, Ruhe und Kraft. Vielen Dank auch an **Sophie** für die Unterstützung bei allen praktischen Arbeiten.

Ohne die Hilfe und Unterstützung meiner Freunde wäre so einiges wesentlich schwieriger bis hin zu nicht machbar gewesen. Ein besonderer Dank geht an meinen Freund und Kompagnon Herr **Dr. Philipp Schlotzhauer** für persönliche und fachliche Gespräche unzählbarer Länge, bedingungslose Unterstützung und Hilfe zu jeder Zeit (auch bei nächtlichen Korrekturarbeiten) und das Wissen um einen lebenslangen Freundschaftsbund. Dass ich immer gerne zur Arbeit gekommen bin, hat zu einem wesentlichen Teil mit den Menschen zu tun, mit denen man sich täglich viele Stunden umgibt: Danke **Tim, Kim** und **André**, dass aus anfänglicher Verhaltenheit unserer Büro 2.127 über die Jahre zu einem sicheren Hafen geworden ist, in welchem Vertrauen und Persönlichkeit oberstes Gut waren. Vielen Dank auch an meine Freunde **Christoph, Timi** und **Nils** für die guten Gespräche und willkommenen Ablenkungen, die das Leben umso lebenswerter machen.

Wie zu Beginn dieser Arbeit schon geschrieben, widme ich diese Arbeit meiner Familie, im Besonderen meiner Mutter **Angelika** und meinem Vater **Václav**. Worte können unsere Verbundenheit nicht beschreiben. Danke für diesen unzerstörbaren Bund.