

# Holzreduzierte Spanplatte

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

Doctor rerum naturalium

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Fachbereich Biologie

Institut für Holzwissenschaften

der Universität Hamburg

Jan T. Benthien

aus Hamburg

Hamburg, 22.02.2022

Vorsitzende der Prüfungskommission: Prof. Dr. Elisabeth Magel, Institut für Holzwissenschaften

Dissertationsgutachter:

- Prof. Dr. Andreas Krause, Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg
- Prof. Dr. Jörg B. Ressel, Institut für Holzwissenschaften

Disputationsgutachter:

- Prof. Dr. Heiko Thömen, Berner Fachhochschule, Biel, Schweiz
- Prof. Dr. Bodo Saake, Institut für Holzwissenschaften

Zusätzliche Fragesteller:

- Dr. Martin Ohlmeyer, Thünen-Institut für Holzforschung
- Dr. Michael Altgen, Aalto University, Espoo, Finnland

Datum der Disputation: 11.10.2022

"Ich und mein Holz best friends forever

HDGDL wir sind unzertrennlich

[...]

Ich und mein Holz, ich und mein Holz

[...]

Meine Bank, mein Tisch, meine Treppe, meine Besen [...], mein Kopf

Meine Gedanken, mein Herz, mein Leben, meine Welt

[...]

Ich und mein Holz, ich und mein Holz"

(257ers, Mikrokosmos, Holz)

#### Vorwort

Grundlage dieser kumulativen Dissertationsschrift sind die fünf nachfolgend aufgeführten Publikationen. Die hierin beschriebenen und ausgewerteten experimentellen Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes "LeiHoWe" (Titel: Entwicklung leichter Holzwerkstoffe unter Anwendung definierter Spangeometrie und Partikelmorphologie, FNR-Förderkennzeichen: 22005613, Laufzeit: 01.10.2014 bis 30.09.2017) durchgeführt. Die Anfertigung und Veröffentlichung der Artikel in "peer-reviewed" Zeitschriften erfolgte u. a. im Anschluss an das genannte Forschungsprojekt.

> Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. Eur J Wood Wood Prod 75[1]:55-62

Benthien JT, Ohlmeyer M, Schneider M, Stehle T (2018) Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. Eur J Wood Wood Prod 76(3):937-945

Benthien JT, Ohlmeyer M (2018a) Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation. Eur J Wood Wood Prod 76(3):1087-1091

Benthien JT, Lüdtke J, Ohlmeyer M (2019a) Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. Eur J Wood Wood Prod 77(6):1029-1043

> Benthien JT, Ohlmeyer M (2020) Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard. MDPI Fibers 8(7):46

# Danksagung

An dieser Stelle ein herzliches Dankeschön allen, die mich beim Erstellen dieser Arbeit hilfreich unterstützt haben, die mir freie Hand bei der Gestaltung des Arbeitsalltages gaben, die sich in großzügiger Geduld übten und nicht den Glauben daran verloren, dass diese Arbeit eines Tages fertig wird.

# Inhaltsverzeichnis

Zu	samme	nfassun	۱g	1		
1	Zielse	elsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungswege				
2	Stand des Wissens					
	2.1	Spanplatte				
		2.1.1	Definition, Spezifizierung und übliche Dichte	5		
		2.1.2	Herstellung	5		
		2.1.3	Ökonomische Bedeutung	6		
		2.1.4	Struktureller Aufbau und dessen Zielsetzung	6		
	2.2	Leichte	e Spanplatte	11		
		2.2.1	Definition	11		
		2.2.2	Zur Begrifflichkeit	11		
		2.2.3	Beweggrund der Herstellung	11		
		2.2.4	Einstellung deutscher Verbraucher gegenüber Möbeln aus leichten Spanplatten	12		
		2.2.5	Ansatz zur Systematisierung leichter Spanplatten	13		
	2.3	Späne.		14		
		2.3.1	Definition und geometrische Charakterisierung	14		
		2.3.2	Spanabmessungen	15		
		2.3.3	Spanform	16		
		2.3.4	Spangröße nach Siebanalyse	16		
		2.3.5	Diversität der Spangeometrie innerhalb eines Spanmaterials und dessen qualitati Charakterisierung mittels Häufigkeits- bzw. Mengenverteilung	ve 17		
		2.3.6	Schüttdichte als Indikator der Partikelgeometrie	18		
		2.3.7	Geometrie von Spänen für die Spanplattenherstellung	19		
2.4 Interpartikuläre Klebverbindungen		artikuläre Klebverbindungen	22			
	2.5	<ul><li>2.5 Verdichtungswiderstand</li><li>2.6 Spanorientierung</li></ul>				
	2.6					
	2.7	(Roh-)	Dichte	24		
	2.8	2.8 Rohdichteprofil				
	2.9	s der Dichte auf die mechanischen Platteneigenschaften	26			
	2.10	.10 Effekt der Rohdichteverteilung auf die Biegeeigenschaften von Spanplatte				

	2.11	Einfluss von Spanabmessungen und Spänen innovativer Form auf die Platteneigenschaften26			
	2.12	12 Hintergrund der ausgewählten Lösungsansätze			
3	Einhe	nheitlich eingesetztes Material und angewendete Methoden			
	3.1	Späne, Bindemittel und Additive29			
	3.2	Spancharakterisierung			
		3.2.1 Schüttdichte			
		3.2.2 Siebanalyse			
		3.2.3 2D-Bildanalyse: Spanlängen- und -breitenmessung			
		3.2.4 Spandickenmessung			
	3.3	Plattenherstellung			
	3.4	Plattenprüfung			
4	Auflis Prom	ung und Kurzzusammenfassungen der Publikationen sowie Darlegung der eigenen Anteile des otionskandidaten an den für diese Dissertation herangezogenen Publikationen			
	Publikation I: Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards (Benthien und Ohlmeyer [2017] Eur J Wood Wood Prod 75[1]:55-62)				
	4.2	Publikation II: Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing (Benthien et al. [2018] Eur J Wood Wood Prod 76[3]:937-945)			
	4.3	Publikation III: Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation (Benthien und Ohlmeyer [2018a] Eur J Wood Wood Prod 76[3]:1087-1091)40			
	4.4	Publikation IV: Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties (Benthien et al. [2019a] Eur J Wood Wood Prod 77[6]:1029-1043)41			
	4.5	Publikation V: Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard (Benthien und Ohlmeyer [2020] MDPI Fibers 8[7]:46)42			
	4.6	Darlegung des eigenen Anteils des Promotionskandidaten an den für diese Dissertation herangezogenen Publikationen43			
5 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse		menfassende Diskussion der Ergebnisse 44			
	5.1	Bedeutung von Spanverdichtung bzw. Verdichtungsverhältnis für die Platteneigenschaften bei reduziertem Holzeinsatz			
	5.2	Verdichtungswiderstand - voluminöse Spanform, geringe Schüttdichte			
	5.3	Zusammenhang zwischen Verdichtungswiderstand und Ausprägung des Rohdichteprofils50			
	5.4	Beziehung zwischen Rohdichteprofil und Biegeeigenschaft52			
	5.5	Orientierung von Mittelschichtspänen53			

	5.6	Einsatz von dicken Spänen in der Mittelschicht	.54	
	5.7	Spanform	.55	
	5.8	Klebstoffmengenberechnung	.55	
6	Fazit u	und Ausblick	58	
Literaturverzeichnis				
Normenverzeichnis				
Abbildungsverzeichnis				
Tabellenverzeichnis				
Anl	hang		68	

#### Zusammenfassung

Spanplatte im engeren Sinne ist ein flachgepresster Holzwerkstoff auf Spanbasis, der für den Bau von nicht tragenden Inneneinrichtungen (einschließlich Möbeln) im Trockenbereich eingesetzt wird, bestimmte Anforderungen nach DIN EN 312:2010-12 zu erfüllen hat (Plattentyp P2), über die Plattendicke einen mehrschichtigen Aufbau zeigt und gewöhnlich eine Dichte um 650 kg/m<sup>3</sup> aufweist. Aus verschiedenen Gründen wird angestrebt, die Menge an Holz - und damit die Plattendichte - für die Herstellung von Spanplatte zu reduzieren. Da jedoch die (mechanischen) Platteneigenschaften bei ansonsten unveränderten Gegebenheiten mit der Dichte (positiv) korrelieren, ist die Reduktion der Menge des eingesetzten Holzes vornehmlich mit einer Reduktion der Platteneigenschaften verbunden. Sollen also holzreduzierte Spanplatten (mit beispielsweise einer Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup>) die üblichen Anforderungen erfüllen, sind Maßnahmen zu ergreifen, mit denen die Eigenschaftsverschlechterungen abzuwenden sind.

Gemeinsames Ziel der vorliegend zusammengefassten Forschungsarbeiten war es abschätzen zu können, ob dies über eine Veränderung von Spanorientierung und -geometrie möglich ist, ohne leichte Nicht-Holz-Füllstoffe zuzusetzen. Idee hierbei war es zum einen, über den so zu verändern beabsichtigten Verdichtungswiderstand der Spanmatte bzw. einzelner Schichten ein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil, folglich Deckschichten höherer Festigkeit und Elastizität, und damit im Effekt insbesondere unveränderte Biegeeigenschaften zu erhalten. Zum anderen war es die Idee, dass der Einsatz dünner, flächiger Deckschichtspäne die Biegeeigenschaften direkt, also allein aufgrund der Spangeometrie, auf dem Niveau herkömmlicher Platten hält. Neben der veränderten Spanorientierung in der Mittelschicht war ein zentraler Ansatz, einen erhöhten Verdichtungswiderstand über eine möglichst voluminöse Spanform (geringe Schüttdichte) zu erreichen.

Zum Prüfen dieser Arbeitshypothesen wurden fünf Untersuchungen durchgeführt, wobei unter Variation der Methode der Holzreduktion (Publikation I), der Orientierung der Mittelschichtspäne (Publikation III) und der Spangeometrie (Publikation IV und V) Laborspanplatten hergestellt und getestet sowie der Verdichtungswiderstand von Spänen unterschiedlicher Geometrie (Publikation II) bestimmt wurde. Ergänzend wurde eine Vielzahl der eingesetzten Späne mittels Siebanalyse, Bildanalyse und manueller Dickenmessung charakterisiert sowie die Veränderung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge mit Veränderung der Spandicke berechnet.

Die Untersuchungen zeigten, dass der Verdichtungswiderstand von Mittelschichtspänen mit geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form den Verdichtungswiederstand von Spänen typischer Form nicht übersteigt. Weiter wurde gezeigt, dass die Eigenschaften von Platten aus solchen Spänen die von herkömmlichen Platten gleicher Dichte nicht übersteigen. Die Befassung mit dem Verdichtungsverhältnis ergab, dass allein dessen Berechnung als Quotient von Holzdichte und Plattendichte eine hilfreiche Kenngröße bei der Herstellung von Spanplatten darstellt. Im Fall von Platten mit vertikal orientierten Spänen in der Mittelschicht sowie Platten mit dicken Spänen als Mittelschichtmaterial wurden weder ein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil noch höhere Biegeeigenschaften festgestellt. Jedoch bewirkte die vertikale Orientierung der Mittelschicht einen derartigen Anstieg der Querzugfestigkeit, dass hinsichtlich dieser Eigenschaft die Platten mit Holzreduktion auf eine Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup> denen gewöhnlicher Spanorientierung und typischen Holzeinsatzes (650 kg/m<sup>3</sup>) vergleichbar waren. Platten mit dünnen, flachen Spänen als Deckschichtmaterial zeigten zwar kein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil, jedoch - wie die Platten mit vertikaler Spanorientierung in der Mittelschicht in Bezug auf die Querzugfestigkeit - hinsichtlich der Biegeeigenschaften einen derartigen Anstieg, dass die holzreduzierten Platten denen typischen Holzeinsatzes vergleichbar waren. Hieraus wurde abgeleitet, dass sowohl im Fall der veränderten Spanorientierung als auch beim Einsatz von dünnen, flachen Spänen als Deckschichtmaterial die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Späne selbst für den Anstieg der Platteneigenschaften verantwortlich sind. Schließlich wurde weder für Späne innovativer Geometrie (geringe Schüttdichte aufgrund der Spanform) ein erhöhter Verdichtungswiderstand festgestellt, der zu einer stärkeren Ausprägung des Rohdichteprofils hätte führen können, noch führte der Einsatz von dünnen, flachen Spänen in der Deckschicht sowie die verändertere Orientierung der Mittelschichtspäne zu einem stärker ausgeprägten Rohdichteprofil. Insbesondere für dünne, flache Deckschichtspäne wurde daher vermutet, dass es aufgrund der Spangeometrie zur Ausbildung belastbarerer Klebstoffverbindungen kommt.

Für eine zukünftige Weiterverfolgung der Fragestellung, ob und in welchem Umfang die Menge an Holz allein durch die eine veränderte Spanorientierung und -geometrie ohne eine Abnahme der mechanischen Platteneigenschaften zu reduzieren ist, wird ausblickend das Erstellen eines Modells zur Vorausberechnung der Platteneigenschaften vorgeschlagen. Dieses Modell sollte die mechanischen Zusammenhänge bei mehrschichtigem Plattenaufbau im Hinblick auf den Einfluss von Schichtdicke und -dichte, insbesondere aber auch Spangeometrie und oberflächenspezifische Klebstoffmenge berücksichtigen. Ein hierfür erforderliches Messsystem, mit dem automatisiert die dreidimensionalen Spanabmessungen zu bestimmen sind, wurde zwischenzeitlich mitentwickelt<sup>1</sup> und vom Projektpartner Anfang 2020 auf den Markt gebracht.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ZIM-FuE-Kooperationsprojekt, Förderkennzeichen ZF4430102GR7, Titel: Entwicklung eines bildanalyse-basierten Systems zur automatischen Bestimmung der Spanabmessungen bei der Spanplattenproduktion

#### 1 Zielsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungswege

Gemeinsames Ziel der vorliegend zusammengeführten Forschungsarbeiten war es abschätzen zu können, ob wesentliche Eigenschaften von Spanplatte, beispielsweise Biegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul, trotz Reduktion des Holzeinsatzes, damit verbundener Dichtereduktion und folglich Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, über Veränderungen von Spanorientierung und -geometrie, jedoch ohne den Einsatz leichter Nicht-Holz-Füllstoffe, auf dem Niveau herkömmlicher Platten zu halten sind. Vorstellung in Bezug auf die Veränderung von Spanorientierung und -geometrie war es, dass zum einen so die Verdichtungswiderstände dahingehend zu verändern sind, dass sich ein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil ausbildet und sich so über den Beplankungseffekt die normalerweise mit Reduktion der Plattendichte einhergehende Reduktion der mechanischen Platteneigenschaften abwenden lässt (**Arbeitshypothese 1**). Zum anderen war es die Vorstellung, dies direkt über eine veränderte Spangeometrie, also ohne (beabsichtigte) Veränderung von Verdichtungswiderstand und Rohdichteprofil, zu realisieren (**Arbeitshypothese 2**). Für beide Ansätze (Erhöhung der Deckschichtdichte sowie direkter Einfluss der Spangeometrie) wurde davon ausgegangen, dass es zu einer Vergrößerung der Klebverbindungsfläche zwischen den Spänen und damit höheren Werkstofffestigkeit und -elastizität kommt.

Zur Prüfung der ersten Arbeitshypothese wurden Platten hergestellt und untersucht, die

- a) eine möglichst vertikale Orientierung der Mittelschichtspäne aufweisen,
- b) für deren Herstellung Späne geringer Schüttdichte aufgrund ihrer Geometrie als Mittelschichtmaterial (großes Verdichtungsverhältnis) sowie
- c) flache, dünne Spänen als Deckschichtmaterial zum Einsatz kamen.

Die zweite Arbeitshypothese wurde anhand von Platten mit flachen, dünnen Spänen als Deckschichtmaterial geprüft.

Überlegung hinter Ansatz (a) zur Prüfung von Arbeitshypothese 1 war, dass der Verdichtungswiderstand von Spänen herkömmlicher Geometrie in Längsrichtung den quer zur Faser deutlich übersteigt, bei Ansatz (b), dass Späne voluminöser Geometrie ihrer Verdichtung einen übergroßen Widerstand entgegen setzen, und bei Ansatz (c), dass dünne, flächige Späne einen geringen Verdichtungswiderstand aufweisen und sich so im Zuge des Heißpressvorgangs stärker verdichtete Deckschichten und eine weniger stark verdichtete Mittelschicht ausbildet. Hintergrund der zweiten Arbeitshypothese waren der Plattenaufbau und die Spangeometrie der einst von Fahrni hergestellten Novopan-Spanplatte sowie das Wissen, dass die Biegeeigenschaften von OSB<sup>2</sup>, also einer Grobspanplatte aus dünnen, flächigen Holzspänen, die von Spanplatte prinzipiell übersteigen.

Konkret wurde in **Publikation I** der Fragestellung nachgegangen, welchen Einfluss das Deck- zu Mittelschichtverhältnis und der Klebstoffanteil in der Mittelschicht auf die Eigenschaften dichtereduzierter Spanplatten haben. Hierfür wurde zum einen die Menge der mit Klebstoff beaufschlagten Späne in Deck- und Mittelschicht sowie nur der Mittelschicht reduziert, zum anderen allein die Menge des eingesetzten Holzes in der Mittelschicht reduziert, während die Menge an Klebstoff konstant gehalten wurde. Untersucht wurde folglich der Effekt des Ortes sowie die Art und Weise der Holzreduktion.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> kurz für engl.: Oriented Strand Board (orientiert-gestreute Grobspanplatte)

In **Publikation II** wurde untersucht, ob Späne mit geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Geometrie ihrer Verdichtung einen übergroßen Widerstand entgegensetzen. Hierfür wurde eine Methode zur experimentellen Bestimmung des Verdichtungswiderstandes entwickelt und für die Untersuchung von Spänen unterschiedlicher Geometrie angewendet. Ergänzend wurde der Verdichtungswiderstand von herkömmlichen Deck- und Mittelschichtspänen sowie der Verdichtungswiderstand von Spänen bestimmt, die mit einem Messerwellenzerspaner hergestellt wurden.

In **Publikation III** wurde der Fragestellung nachgegangen, ob sich über die vertikale Orientierung von Mittelschichtspänen herkömmlicher Geometrie eine stärkere Verdichtung der Deckschichten und in Folge bessere Biegeeigenschaften erzielen lassen. Beschrittener Lösungsweg war die Herstellung von Laborspanplatten mit entsprechend angepasster Streuung.

In **Publikation IV** wurde untersucht, ob über die Erhöhung der Dicke der Mittelschichtspäne eine stärkere Verdichtung der Deckschichten und in Folge bessere Biegeeigenschaften erzielen lassen. Hierfür wurden unter Variation der Schneidenüberstände im Messerringzerspaner Späne unterschiedlicher Dicke hergestellt und als Mittelschichtmaterial eingesetzt. Ergänzend wurde der Zusammenhang von Spangeometrie und oberflächen-spezifischer Klebstoffmenge betrachtet.

In **Publikation V** wurde den Fragestellungen nachgegangen, ob sich mit flachen, dünnen Deckschichtspänen (a) aufgrund des vermuteten geringen Verdichtungswiderstandes stark verdichtete Deckschichten und in Folge höhere Biegeeigenschaften erzielen lassen oder (b) aufgrund der Spangeometrie eine direkte Erhöhung der Biegeeigenschaften zu erreichen ist. Hierfür wurden Deckschichtspäne mit einem Messerscheibenzerspaner hergestellt und als Deckschichtmaterial eingesetzt. Ergänzend wurden Späne variierter Dicke als Mittelschichtmaterial eingesetzt. Beim überwiegenden Teil der Forschungsarbeiten wurde eine umfangreiche Partikelcharakterisierung (Sieb- und Bildanalyse, händische Spandickenmessung, Schüttdichtebestimmung) durchgeführt, um eine belastbare Beschreibung der Spangeometrie geben zu können. Bei Herstellung von Laborspanplatten wurden stets die Rohdichteprofile als strukturbeschreibendes Merkmal bestimmt. In vier von fünf der Arbeiten wurden unter Variation von Spanorientierung oder -geometrie Laborspanplatten typischen (650 kg/m<sup>3</sup>) und reduzierten (500 kg/m<sup>3</sup>) Holzeinsatzes hergestellt, deren Eigenschaften bestimmt und diese miteinander verglichen. Die Bestimmung des Verdichtungswiderstandes von Spänen unterschiedlicher Geometrie wurde ohne die Herstellung von Laborspanplatten durchgeführt.

#### 2 Stand des Wissens

#### 2.1 Spanplatte

#### 2.1.1 Definition, Spezifizierung und übliche Dichte

Spanplatte ist nach DIN EN 309:2005-04 als plattenförmiger Holzwerkstoff definiert, der durch Heißverpressen von Holz- (Späne, Wafers<sup>3</sup>, Strands<sup>4</sup>) und/oder anderen lignozellulosehaltigen Partikeln (z. B. aus Einjahrespflanzen) mit Klebstoffen hergestellt wird und nach verschiedenen Merkmalen (z. B. Herstellungsverfahren, Oberflächenbeschaffenheit, Form, Größe und Form der zur Herstellung eingesetzten Partikel, Plattenaufbau oder Verwendungszweck) zu klassifizieren ist. In DIN EN 312:2010-12 werden Anforderungen an die Eigenschaften von Spanplatte allgemein sowie die Anforderungen an die nach Verwendungsbereich (trocken/feucht), -zweck (nicht tragend/tragend) und Belastbarkeit (-<sup>5</sup>/hoch) klassifizierten Plattentypen (P1...P7) aufgeführt.

Unter Spanplatte im engeren Sinne wird eine flachgepresste Holzwerkstoffplatte aus (Holz-) Spänen, mit geschliffener, glatter Oberfläche und über die Plattendicke drei- oder mehrschichtigem Aufbau verstanden, die für den Bau von nicht tragenden Inneneinrichtungen (einschließlich Möbeln) im Trockenbereich einzusetzen ist (nach DIN EN 312:2010-12 Plattentyp P2). Als spezielle Anforderungen für diesen Plattentyp werden - in Abhängigkeit des Nennmaßes der Plattendicke - Mindestwerte für die Biegefestigkeit, den Biege-Elastizitätsmodul (beide DIN EN 310:1993-08) sowie die Querzug- (DIN EN 319:1993-08) und Abhebefestigkeit (DIN EN 311:2002-08) angegeben. Für Dickenbereich >13 bis 20 mm sind dies konkret:

- Biegefestigkeit: 11 N/mm<sup>2</sup>
- Biege-Elastizitätsmodul: 1.600 N/mm<sup>2</sup>
- Querzugfestigkeit: 0,35 N/mm<sup>2</sup>
- Abhebefestigkeit: 0,8 N/mm<sup>2</sup>

Die übliche Dichte von Spanplatte liegt im Bereich von 600 bis 680 kg/m<sup>3</sup> (WPIF 2014<sup>6</sup>).

#### 2.1.2 Herstellung

Der erste Verfahrensschritt zur Herstellung von Spanplatte ist die Aufbereitung des eingesetzten Holzes zu Spänen. Hierfür werden zunächst Hacker und weiter Messerringzerspaner oder Prall- bzw. Schlagmühlen für die Nachzerkleinerung eingesetzt. Die Verwendung von Industrierest- und Gebrauchtholz kann den vorgelagerten Einsatz eines Brechers erfordern. Sägenebenprodukte (vornehmlich Sägemehl und Hobelspäne) lassen sich direkt einsetzten. Eine direkte Aufarbeitung von Rundholz zu Spänen kann beispielsweise durch den

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> große, flächige Späne zur Herstellung von Waferboard (unorientiert-gestreute Grobspanplatte)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> lange, schlanke Grobspäne zur Herstellung von OSB (orientiert-gestreute Grobspanplatte)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> es wird nur der Belastbarkeitstyp "hoch", nicht aber ein Pendant genannt

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> "Panel density [...] varies depending upon the product, being affected by the timber species and the process used in manufacture. Typical densities are 600 kg/m<sup>3</sup> to 680kg/m<sup>3</sup>." (Die Plattendichte variiert je nach Produkt und wird durch die Holzart und das Herstellungsverfahren beeinflusst. Die typischen Dichten liegen zwischen 600 kg/m<sup>3</sup> bis 680 kg/m<sup>3</sup>.) (WPIF 2014, Seite 99)

Einsatz eines Messerwellenzerspaners realisiert werden. In der Vergangenheit wurden hierfür Messerscheibenzerspaner eingesetzt.

Im Anschluss an die Zerspanung werden die Späne getrocknet und durch Siebung (Klassieren nach Größe) und Sichtung (Klassieren nach der Dichte, z.B. pneumatisch) in Deck- und Mittelschichtspäne fraktioniert sowie Staub- und Grobanteile ausgeschleust (thermische Verwertung) bzw. einer Nachzerkleinerung zugeführt. Die getrockneten Spanfraktionen werden mit Klebstoff beaufschlagt, zu unterschiedlich strukturierten Spanmatten gestreut und in einer Heißpresse verdichtet (Ausbildung von Kontaktflächen zwischen den Spänen) und der Klebstoff ausgehärtet.

Technischer Stand für das Verpressen der Spanmatte sind kontinuierlich arbeitende Doppelbandpressen. Entsprechend dem gefahrenen Pressprogramm (Verlauf von Pressbanddistanz, Presstemperatur und Pressdruck über den Pressweg) lassen sich - neben der Plattenzieldichte - die resultierenden Platteneigenschaften u. a. über die Erzeugung bestimmt ausgeprägter Rohdichteprofile über den Plattenquerschnitt gezielt steuern. Eine zügige Verdichtung der Spanmatte hat beispielsweise ein Rohdichteprofil hoher Deck- und geringer Mittelschichtdichte zur Folge, da zunächst das Deckschichtmaterial plastifiziert und sich so leichter verdichten lässt. Das Mittelschichtmaterial ist hingegen zu Beginn des Pressvorgangs noch kalt und setzt dem Verdichtungsdruck noch den ursprünglichen Verdichtungswiderstand entgegen. Nach der Heißverpressung werden die Platten passiv gekühlt (Sternwender), konditioniert (Stapellagerung), geschliffen (Entfernung der Presshaut und Dickenkalibrierung), auf Maß geschnitten und bis zur Weiterverarbeitung oder zum Versand gelagert.

#### 2.1.3 Ökonomische Bedeutung

Mit einem Anteil von 54,2 % (32,1 Mio. m<sup>3</sup>) an der europäischen Holzwerkstoffproduktion (59,2 Mio. m<sup>3</sup>) in 2019 (ohne Russland und Türkei), ist Spanplatte in Bezug auf das Produktvolumen einer der bedeutendsten Holzwerkstoff. 67 % der in Europa gehandelten Spanplatten werden von der Möbelindustrie abgenommen und verarbeitet, 26 % gehen in den Bausektor (inkl. Türen und Boden), 2 % Verpackungen, 5 % andere Anwendungen (EPF 2020). Das weltweite Produktionsvolumen von Spanplatte betrug in 2019<sup>7</sup> 97,5 Millionen m<sup>3</sup> (FAO 2020).

#### 2.1.4 Struktureller Aufbau und dessen Zielsetzung

Spanplatte hat über die Plattendicke vornehmlich einen dreischichtigen Aufbau, mit Deckschichten aus feinen und einer Mittelschicht aus groben Spänen bzw. gleitendem Übergang der Spangrößen zwischen den Schichten. Über den Plattenquerschnitt liegt weiter eine ungleiche, aber symmetrische Verteilung der Dichte vor. Der Verlauf der Dichte über die Plattendicke zeigt hierbei ein charakteristisches Profil, mit Deckschichten höherer Dichte und niedriger Dichte in der Mittelschicht (Abbildung 1). Ursache für die Ausbildung des sogenannten Rohdichteprofils sind - neben weiteren Einflussgrößen - zum einen die Verteilung der Spangröße über den Querschnitt, zum anderen die Parameter des Pressprozesses.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Summe über alle Länder, Produktionsmenge (Production Quantity), Spanplatte (Particle board), Jahr 2019



Abbildung 1: Rohdichteprofil einer ungeschliffenen Spanplatte (schematisiert). r<sub>max</sub> = Rohdichtemaximum; r<sub>min</sub> = Rohdichteminimum; r = mittlere Rohdichte; DS = Deckschicht; MS = Mittelschicht (Boehme 1992)

Absicht des Aufbaus der Deckschichten aus feinem Spanmaterial sowie die gezielte Steuerung des Pressprozesses zur Ausprägung einer hohen Deckschichtdichte ist - mit Blick auf eine spätere Oberflächenbeschichtung<sup>8</sup> - der Erhalt einer homogenen, ebenen und glatten<sup>9</sup> Oberfläche mit gleichmäßigen Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften sowie einheitlichem Quell- und Schwindverhalten. Nebeneffekt stark verdichteter Deckschichten ist, dass diese das mechanische Verhalten der Platte positiv beeinflussen. Eine weitere Erhöhung der mechanischen Eigenschaften der Deckschichten wäre zu erzielen, wenn anderes als feines Spanmaterial für den Aufbau der Deckschichten eingesetzt werden würde, wobei das der zuvor beschriebenen Aufgabe der Deckschichten von Spanplatten für die Beschichtung entgegenstünde.

Der Grobheit des Mittelschichtmaterials sind u. a. dadurch Grenzen gesetzt, als dass auch die Plattenkanten (Schmalflächen) in vielen Anwendungsfällen beschichtet werden und auch hier ein Durchscheinen der Späne vermieden und ein sicheres Anhaften des Kantenmaterials (ausreichend große Klebfläche) sicherzustellen ist. Weiter kann der Kanten-Schraubenausziehwiderstand für die Verwendung von Bedeutung sein und so dem Aufbau der Mittelschicht (Spangröße, Dichte) Grenzen setzen.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> z. B. Direktlackierung, Folienbeschichtung oder Pressbeschichtung

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> im Sinne von geschlossen

Gegenüber Vollholz sind Holzwerkstoffe aus mehreren<sup>10</sup> bzw. einer Vielzahl<sup>11</sup> von Elementen aus Holz zusammengefügt. Im Vergleich zu Vollholzwerkstoffen (z. B. Dreischichtplatte), Furnierwerkstoffen (z. B. Sperrholz) oder Verbundwerkstoffen (z. B. Stabsperrholz) sind die zur Herstellung von Spanplatte verwendeten Strukturelemente klein; der Aufschlussgrad des primären Rohstoffes, dem Rundholz, ist hoch (Span), wenn auch nicht so hoch wie bei Faserplatten (Faser und Faserbündel) oder Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff (z. B. Holzmehl). Die Art des Strukturelements, aus dem Spanplatte aufgebaut ist, stellt vergleichsweise geringe Anforderungen an die Qualität des Rohstoffes, sodass nicht zwingend hochwertiges Rundholz für deren Herstellung eingesetzt werden muss, sondern neben Industrieholz auch Sekundärrohstoffe wie Industrierestholz, Sägenebenprodukte und Altholz verwendet werden können. Auch ist der Nutzungsgrad des Rohstoffes bei Spanplatte vergleichsweise hoch. Anders als bei Schnittholz oder vollholz- bzw. furnierbasierten Werkstoffen fällt nur eine vergleichsweise geringe Menge an nicht weiter für das Produkt verwendbarem Verschnitt (nämlich der Siebverlust) an. Der Unterschied zwischen der Größe der Strukturelemente und den Abmessungen von Rundholz (Aufschlussgrad), genauer der Unterschied zwischen der Größe der Strukturelemente und den Abmessungen des Werkstoffes bzw. den später daraus gefertigten Produkten ist bei Spanplatte so groß, dass insbesondere die mechanischen Eigenschaften des gewachsenen Holzes nicht mehr direkt die Eigenschaften des Werkstoffes bestimmen sowie eine verringerte Anisotropie und eine erhöhte Homogenität gegenüber Massivholz vorliegt. Während eine verringerte Anisotropie und eine erhöhte Homogenität technische Vorteile bringen, hat das Aufbrechen des gewachsenen Holzes und Zusammenfügen der entstandenen Elemente zumindest immer dann eine Verringerung der Elastizität und Festigkeit zur Folge, wenn als Vergleichswert die größte der in den holzanatomischen Richtungen vorliegende Elastizität- bzw. Festigkeit herangezogen wird. Die Nutzbarkeit von minderwertigen Holzsortimenten als Ausgangsmaterial für die Spanerzeugung schafft Plattenherstellern die Möglichkeit, Alternativprodukte u. a. aufgrund der geringeren Rohstoffkosten im Preis zu unterbieten. Anders als bei Schnittholz stehen die Abmessungen von Spanplatte nicht in Zusammenhang mit den Abmessungen des Rohstoffes, sondern sind vielmehr von den Abmessungen der Heißpresse bestimmt. Die Kombination der Größe der Strukturelemente (Späne) und dem Herstellungsverfahren (Flachpressprozess) macht Spanplatte zu einem Werkstoff, mit dem sich vergleichsweise einfach zweckmäßige, funktionsgerechte und gebrauchstaugliche Möbel in Plattenbauweise (z. B. Küchen- und Aufbewahrungsmöbel, Tische bzw. Tischplatten) herstellen lassen.

Die sich aus dem strukturellen Aufbau ergebenden Vorteile gegenüber Vollholz und anderen Holzwerkstoffen lassen sich in verschiedenen Beschreibungen des Aufkommens von Spanplatte als Beweggrund für deren Entwicklung wiedererkennen. Im deutschsprachigen Eintrag "Spanplatte<sup>"12</sup> der Online-Enzyklopädie "Wikipedia" wird beispielweise Max Himmelheber die Entwicklung der Spanplatte zugeschrieben und als dessen Beweggrund die Absicht der Steigerung des Verwertungsgrades von Bäumen angegeben. Im englischsprachigen Eintrag "Particle board"<sup>13</sup> wird der Ursprung der Spanplatte – wie auch bei Paulitsch und Barbu (2015) – auf das Jahr 1887 datiert, in dem Ernst Hubbard – laut angegebenen Quellen<sup>14</sup> – das, wie er es nannte, "künstliche

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> z. B. Balkenschichtholz aus zwei miteinander verklebten Lamellen oder Brettstapelplatte, gedübelt oder mit Schwalbenschwanzverbindung

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> z. B. Mitteldichte Faserplatte (MDF) aus miteinander verklebten Holzfasern und Faserbündel (Trockenverfahren), Hartfaserplatte aus ineinander verfilzten Holzfasern und Faserbündeln (Nassverfahren)

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> URL: http://www.de.wikipedia.org/wiki/Spanplatte (Abrufdatum: 09.04.2021)

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> URL: http://www.en.wikipedia.org/wiki/Particle\_board (Abrufdatum: 09.04.2021)

 <sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Wikipedia: Rowell RM (Ed.) (2013) Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press; Paulitsch und Barbu:
Hubbard E (1887) Die Verwertung der Holzabfälle, Hartleben, 183 S

Holz" fertigte. In der peer-reviewed Literatur hebt wiederum beispielsweise Klauditz (1955) für die Zeit der Entwicklung der Spanplatte das Patent von Felix Pfohl aus dem Jahr 1936 hervor, in dem Bedingungen für die Herstellung fester, leichter Holzspanplatten mit dreischichtigem Aufbau und spezieller Oberflächengüte angegeben werden, die für eine bestimmte Kundengruppe (Tischlerplatte) und Verwendung (Möbelbau) vorgesehen wurden. Kehr (1974) erklärt die Entwicklung der Spanplattenindustrie in einer auf die Zeit nach dem 2. Weltkrieg fokussierten Betrachtung mit dem Bedürfnis, die in der Holzindustrie anfallenden Abfallspäne (mutmaßlich dem heutigen Industrierestholz vergleichbar) einer volks- und betriebswirtschaftlich möglichst optimalen Verwertung zuzuführen und die Möbelindustrie sowie die Bauwirtschaft mit Werkstoffen zu versorgen. Auch Klauditz (1955) gibt für die ersten Jahre nach dem Krieg als Grund für die Herstellung von Spanplatte den Mangel an Roh- und Werkstoffen bzw. die Möglichkeit der Nutzung von minderwertigen Holzsortimenten für die Herstellung von Spanplatte an.

Rowell (2013) listet als Gründe für die Herstellung von Holzwerkstoffen auf:

- wirtschaftliche Vorteile:
  - Effizientere Nutzung von Stammholz vor dem Hintergrund ständig steigender Kosten für Rund- und Schnittholz
  - Nutzbarkeit minderwertiger Stämme (Durchforstungsholz, gebogene und verdrehte Stämme) sowie Sekundärrohstoffen (Nebenprodukte, Recyclingmaterial)
- Bedürfnis nach Baumaterial aus Holz mit
  - o geringerer Eigenschaftsvariabilität als bei Massivholz
  - o gezielt gestalteten Eigenschaften
  - o weniger in der Größe begrenzten Abmessungen als Vollholz

Ein Beispiel, bei dem der strukturelle Aufbau von Spanplatte und die daraus resultierenden Effekte besonders deutlich werden, sowie Holzabfälle für die Herstellung eingesetzt wurden, ist die von Fahrni zum Patent angemeldete Novopan-Platte<sup>15</sup>. Für deren Herstellung wurden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als vorteilhaft erscheinende, kostengünstige Holzabfälle für die Bildung einer porösen Mittelschicht und für die Deckschichten speziell hergestellte hobelspanartige Schneidspäne (Scheibenhobelmaschine mit vertikaler Messerscheibe) verwendet (Wyss 1981). Eine Vorstellung dieser Späne kann aus Abbildung 2 gewonnen werden. Die aus dieser Rohstoffzusammensetzung entstehenden Platten zeigten ein deutlich ausgeprägtes Rohdichteprofil, mit Deckschichten hoher Verdichtung (930 kg/m<sup>3</sup>) und entsprechend lasttragenden Eigenschaften sowie einer weniger verdichteten Mittelschicht (540 kg/m<sup>3</sup>) (Keylwerth 1958). Eine Vorstellung dieser Platte kann aus Abbildung 3 gewonnen werden.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Patentnummer, DBP 967328, genannt in Wyss (1981)



Abbildung 2: "NOVOPAN - Flachspäne" mit Zentimetermaßstab (Neumann 1951)



Abbildung 3: "NOVOPAN - Platte" (Neumann 1951)

#### 2.2 Leichte Spanplatte

#### 2.2.1 Definition

Entsprechend der Definition in DIN CEN/TS 16368 ist Spanplatte mit einer Dichte unter 600 kg/m<sup>3</sup> als "Leichte Spanplatte" zu verstehen. Für Holzwerkstoffe generell - und damit auch für Spanplatte - hat sich eine Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup> (Michanickl 2004, Thoemen 2008) bis 550 kg/m<sup>3</sup> (Hasch 2017) als Wert etabliert, ab dem Platten als "leicht" bezeichnet werden.

#### 2.2.2 Zur Begrifflichkeit

Der Begriff "leicht" ist bei genauer Betrachtung umgangssprachlich und aus physikalischer Sicht nicht hinreichend präzise. Die Dudenredaktion (o. J.) beschreibt die Bedeutung von "leicht" mit "von geringem Gewicht". Physikalisch betrachtet ist "Gewicht" jedoch die durch Wirkung eines Schwerefeldes (z. B. dem der Erde) verursachte Kraft (Gewichtskraft) auf einen Körper definierter Masse (Gleichung 1) und somit vom Ort der Betrachtung abhängig.

 $G = m \cdot g$ 

mit

G Gewichtskraft in N

m Masse in kg

g Erdbeschleunigung in  $m/s^2$ 

Physikalisch präziser als "leichte Spanplatte" oder "gewichtsreduzierte Spanplatte" ist daher die Bezeichnung "massereduzierte Spanplatte", wobei hier die Anforderung einer unveränderter Produktdicke nicht zwangsläufig Berücksichtigung findet. Der Begriff "dichtereduzierte Spanplatte" berücksichtig die Produktdicke, da zur Berechnung der Dichte die Masse in Relation zum Plattenvolumen gesetzt wird. Steht weniger das Plattengewicht, sondern vielmehr die Einsparung des Rohstoffes Holz bei der Herstellung von leichten Spanplatten im Fokus, ist die Bezeichnung "holzreduzierte Spanplatte" ein passender Begriff.

#### 2.2.3 Beweggrund der Herstellung

Beweggrund der Herstellung leichter Spanplatte ist es grundsätzlich, den betriebswirtschaftlichen Gewinn, also die Differenz zwischen Erlös und Kosten, gegenüber dem der Herstellung herkömmlicher Spanplatte zu verbessern oder aber, bei veränderten Rahmenbedingungen (z. B. gestiegene Rohstoffkosten), auf dem bisherigen Niveau der Herstellung herkömmlicher Spanplatte zu halten, mindestens jedoch nicht negativ werden zu lassen. Dies versucht man entweder durch das Bedienen der Nachfrage nach Spanplatten mit geringer Dichte oder die - relativ zur Produktionsmenge - Reduktion der Holzmenge zu erreichen. Während im ersten Fall das Anbieten eines neuen Produktes mit veränderten Eigenschaften im Vordergrund steht, geht es im zweiten Fall entweder darum, den Gewinn durch die Reduktion der Materialkosten zu erhöhen (kurzfristiger Zeithorizont), oder - bei perspektivisch steigenden Materialkosten - langfristig wirtschaftlich produzieren zu können ohne die Verkaufspreise anheben zu müssen. Für die Herstellung von Leichtbauplatten mit speziellen Eigenschaften ist es denkbar, dass höhere Produktionskosten, z. B. aufgrund der Durchführung von Maßnahmen zur Gewichtsreduktion, vertretbar sind, wenn sich diese über höhere Erlöse tragen. Soll hingegen ein

Gleichung 1

bestehendes Produkt durch die Reduktion der eingesetzten Menge an Holz kostengünstiger hergestellt werden, kann der finanzielle Spielraum für die Umgestaltung des Produktionsprozesses klein sein.

In der Debatte um leichte Spanplatte ist - wenn nicht explizit eine geringe Plattendichte im Fokus steht - die Argumentation häufig auf Aspekte konzentriert, die beim Heranziehen der Systematisierung des Leichtbaus von Wiedemann (2007) dem Öko-Leichtbau zuzuordnen sind.

Definitionen nach Wiedemann (2007):

- <u>Zweck-Leichtbau</u>: Funktionsbedingung, d. h. die Massereduktion eines Bauteils ist zweckmäßig oder notwendig, um gewisse Systemfunktionen realisieren oder beherrschen zu können. Kostenkriterien können hierbei in den Hintergrund treten.
- <u>Spar-Leichtbau</u>: Bemühung um direkte Kosteneinsparungen bei Material und Herstellung. Der Materialaufwand wird durch eine bessere Nutzung, durch Abmagern oder funktionsgerechtes Gestalten der Struktur, Einsatz von Materialalternativen, die trotz eines geringeren Produktgewichtes zu gleichen Produkteigenschaften führen, reduziert.
- <u>Öko-Leichtbau</u>: nur indirekt auf dem ökonomischen Prinzip begründet und hat beispielsweise Einsparungen beim Energieverbrauch zum Ziel.

Angeführt werden beispielsweise eine erleichterte Manipulation<sup>16</sup> und Bearbeitung der Platten in der Produktion und Weiterverarbeitung, eine effektivere und damit treibstoffsparende LKW-Auslastung<sup>17</sup>, die Reduktion der Verpackungseinheiten von Möbeln in Mitnahme-Läden und für Versandgeschäfte bei gleichzeitiger Erfüllung der Gewichtsobergrenze sowie die grundsätzliche Schonung nachwachsender und fossiler Ressourcen sowie reduzierte Beanspruchung technische Anlagen und Werkzeuge. Motivationen des Spar-Leichtbaus werden hingegen nicht in den Vordergrund gestellt, wenngleich diese bei nüchterner Betrachtung des grundliegenden Ziels unternehmerischer Aktivität, nämlich die Erzielung des größtmöglichen Gewinns, direkt einleuchten und nicht, wie im Fall des Öko-Leichtbaus, mit dem expliziten Kundenwunsch nach Produkten geringer Material- und Energieaufwendungen in der Produktion oder der Reaktion auf marktinterventionistische Maßnahmen der Politik erklärt werden müssen. Das mag daran liegen, dass die Merkmale und Effekte des Öko-Leichtbaus in das öffentliche Meinungsbild passen und Ziele von Förderprogrammen bedienen. Letztendlich wird es aber immer so sein, dass Veränderungen an bestehenden Produktionsabläufen nur dann vorgenommen werden, wenn daraus betriebswirtschaftliche Vorteile zu erwarten sind. Schließlich ist Leichtbau kein Selbstzweck, sondern in allen drei Fällen, dem Zweck-Leichtbau, dem Spar-Leichtbau und dem Öko-Leichtbau, eine betriebswirtschaftliche Abwägung zwischen Aufwand und Ertrag.

# 2.2.4 Einstellung deutscher Verbraucher gegenüber Möbeln aus leichten Spanplatten

Anders als es die als akzeptiert erscheinende öffentliche Meinung zur Notwendigkeit eines schonenderen Umgangs mit Rohstoffen und Energie erwarten lassen würde, konnte Knauf (2015) im Rahmen einer Marktstudie keine konsumentenverursachte Nachfrage nach Leichtbau-Möbeln feststellen. Dies ist erstaunlich, da

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> zielgerichtetes Bewegen einer Sache

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Anstieg des bewegten Produktvolumens bei gleichbleibender Masse, die Kapazitätsgrenze wird derzeit über die Masse und nicht über das Volumen limitiert

sich der Leichtbau einfach mit Ressourcenschonung in Verbindung bringen lässt und in anderen Märkten die Bewerbung eines Produktes als ökologisch vorteilhaft zu einer positiven Kaufentscheidung führt. Hieraus ließe sich schlussfolgern, dass dem Verbraucher entweder der Zusammenhang von Leichtbau und Energiesowie Materialeinsparung (Öko-Leichtbau) nicht bewusst ist oder bei Möbeln - anders als bei vielen anderen Produkten wie beispielsweise Fahrrädern - Gewicht mit Qualität und Werthaltigkeit in Verbindung gebracht wird. Knauf (2005) fand zusätzlich zur Qualität, dass sowohl der Preis als auch die Gestaltung ausschlaggebende Argumente für die Kaufentscheidung sind. Das Gewicht des Möbelstückes ist von zweitrangiger Bedeutung. Dies zeigt, dass sich der Leichtbau derzeit nicht als Marketinginstrument nutzen lässt. In Kombination aus der Erkenntnis, dass die Verbraucher keine Vorbehalte gegen Leichtbaumöbel haben, solange diese nicht als solche beworben oder ausgewiesen wenden, folgert Knauf, dass, wenn die Holzwerkstoff- und Möbelindustrie eine Gewichtsreduktion von Platten und Möbeln aus anderen Gründen als der Absatzsteigerung vornehmen will, sie dies tun sollte ohne den Endverbraucher darüber zu informieren.

#### 2.2.5 Ansatz zur Systematisierung leichter Spanplatten

Aufgrund der engen Korrelation zwischen Plattenrohdichte und mechanischen Platteneigenschaften ist eine simple Verringerung des Holzeinsatzes zur Einsparung von Rohstoffkosten nicht möglich. Soll der Holzeinsatz unter Erhalt entsprechender Festigkeitseigenschaften reduziert werden, so sind Maßnahmen zum Abwenden der Eigenschaftsverschlechterung zu ergreifen. Diese lassen sich beispielsweise nach dem in Abbildung 4 dargestelltem Schema kategorisieren, das bereits für Lehrveranstaltungen (Lüdtke 2017) herangezogen und in einer Übersicht zu Innovationen in der Holzwerkstoffindustrie (Hasch 2017) genutzt, tatsächlich aber erst von Benthien und Ohlmeyer (2018b) sowie Benthien et al. (2019a) vorgestellt wurde. Die mit dem Schema beschriebenen Maßnahmen müssen hierbei nicht zwangsläufig zu dichtereduzierten Platten führen, die alle Eigenschaften der Ausgangsplatte (z.B. Spanplatte vom Typ P2 nach EN 312:2010-12) erfüllen (Stichwort: funktionsangepasste Spanplatte).



Abbildung 4: Schema zur Systematisierung von Maßnahmen, mit denen die Eigenschaften holzreduzierter Spanplatte auf dem Niveau herkömmlicher Platten gehalten oder funktionsoptimierte Platten erhalten werden.

Ausgehend von einer herkömmlichen Spanplatte (Ausgangsplatte) lassen sich Maßnahmen zur Abwendung der Eigenschaftsverschlechterung bei Holz- bzw. Dichtereduktion nach dem in Abbildung 4 dargestellten Schema wie folgt kategorisieren. Zu unterscheiden ist zunächst, ob eine Anpassung am Material oder an der Struktur der Spanplatte vorgenommen wurde. Im Fall einer Materialanpassung kann weiter zwischen einer Anpassung der Spangeometrie und einer Anpassung des Materials (z.B. Holzart) unterschieden werden, das für die Spanherstellung verwendet wurde. Im Fall der Strukturanpassung ist zwischen einer Anpassung der

Dichteverteilung (Rohdichteprofil, horizontales Dichteprofil, periodische Veränderung des Rohdichteprofils) und einer Anpassung der Spanorientierung zu unterschieden.

Bei der Kategorisierung nach dem in Abbildung 4 dargestelltem Schema ist darauf zu achten, dass die eigentliche Maßnahme zur Abwendung der Eigenschaftsverschlechterung (z. B. Veränderung der Spangeometrie) Kriterium der Zuordnung bleibt, wenn gleich ein hieraus resultierender Effekt (z. B. Veränderung der vertikalen Dichteverteilung) ebenfalls zum Eigenschaftserhalt beiträgt.

Eine beispielhafte Anwendung des Kategorisierungsansatzes holzreduzierter Spanplatten ist in Benthien und Ohlmeyer (2018b) zu finden.

#### 2.3 Späne

#### 2.3.1 Definition und geometrische Charakterisierung

Im physikalischen Sinne sind Späne Körper, die in den drei Dimensionen des Raumes - Länge, Breite und Höhe (Dicke) - ein Volumen einnehmen und über ihre Oberfläche begrenzt sind. Die räumliche Ausdehnung ist ein wichtiges Merkmal zur Charakterisierung von Spänen und lässt sich mit dem Begriff der Spangeometrie fassen. Die Geometrie von Spänen lässt sich wiederum in Spanform<sup>18</sup> (Gestalt oder Morphologie) und Spanabmessungen<sup>19</sup> (Länge, Breite oder Dicke) unterteilen. Von den Spanabmessungen und der Spanform determiniert, sind die Spanoberfläche und das Spanvolumen weitere wichtige Kenngrößen von Spänen. Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten werden in Abbildung 5 veranschaulicht.



Abbildung 5: Veranschaulichung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Spangeometrie und Spanabmessungen sowie Spanform (links) und Spanabmessungen sowie Spanform und Spanoberfläche bzw. Spanvolumen (rechts).

Eine weitere gebräuchliche Größe im Kontext der geometrischen Spancharakterisierung ist die Span- bzw. Partikelgröße<sup>20</sup>. Der Begriff der Spangröße ist im Vergleich zu Spanabmessungen und Spanform in seiner semantischen Selbstdefinition weniger eindeutig. Unter dem Begriff Spangröße werden zum einen die Spanabmessungen angegeben, zum anderen aber auch die Ergebnisse der Siebanalyse beschrieben, wobei die

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> engl. particle shape

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> engl. particle dimensions

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> engl. particle size

Späne hier auf ein kombiniertes Merkmal aus Spanform und Spanabmessungen hin untersucht bzw. fraktioniert werden.

In DIN ISO 9276-1:2004-09 (Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen) wird unter der Partikelgröße die physikalische Eigenschaft verstanden, die zur Charakterisierung der Späne herangezogen wurde. Also beispielsweise die Spanlänge, -breite oder -dicke, die Spanoberfläche oder das Spanvolumen. Hierbei wird die herangezogene Eigenschaft stets als Längenmaß angegeben. Im Fall von Spanlänge, -breite und dicke ist dies direkt möglich; im Fall der Spanoberfläche mittels des Durchmessers einer oberflächengleichen Kugel; im Fall des Spanvolumens einer volumengleichen Kugel. Andere Definitionen für Partikelgröße, wie beispielsweise der Durchmesser eines flächengleichen Kreises im Fall der Projektionsfläche eines Spans oder die Maschenweite bei der Siebanalyse verwendeter Siebe sind denkbar.

#### 2.3.2 Spanabmessungen

Unter den Spanabmessungen sind die Längenmaße der drei Hauptachsen (Länge, Breite und Dicke) zu verstehen. Die Länge eines Spans wird hierbei als dessen maximale räumliche Ausdehnung in longitudinaler, holzanatomischer Richtung verstanden (Niemz und Wenk 1989). Als Spanbreite wird die maximale Spanabmessung senkrecht zur Faserrichtung definiert. Explizit im Fall für Spanplatten gefertigte Schneidspäne weisen Niemz und Wenk (1989) auf das Vorliegen von Faserparallelität hin, also die Übereinstimmung von Iongitudinaler Holzrichtung und maximaler Spanausdehnung. Selbst wenn dies nicht direkt nach der Zerspanung zutreffen sollte, so ist hiermit doch spätestens nach intensiver Manipulation (Transport, Klebstoffauftrag, Streuung, ...) zu rechnen, da orthogonal zur Faserrichtung die Festigkeit des Holzes wesentlich geringer als in Faserrichtung ist und entsprechend hier eine Einkürzung stattfindet. Gleicher Argumentation folgt auch May (1982), der in einem Aufsatz zu den Möglichkeiten der Anwendung industrieüblicher Sortierverfahren zur Beurteilung von Spangemischen darauf hinweist, dass mit zunehmender Nachzerkleinerung herstellungsund holzartbedingte Unterschiede in der Spanabmessungen verwischen und längliche Spanformen erhalten werden, also eine Einkürzung in der Breite erfolgt und die Spanabmessung in Faserrichtung erhalten wird . Die Spandicke definieren Niemz und Wenk (1989) als maximale Ausdehnung senkrecht zur Partikelfläche. Die sich bei Manipulation einstellende Spanbreite steht in Abhängigkeit zur Spandicke, da diese direkten Einfluss auf die Größe der potenziellen Bruchfläche und damit Widerstandsfähigkeit gegen die mit Manipulation einhergehende Nachzerkleinerung hat. Entsprechend dem Bestreben nach ungezwungener Streuung den Zustand geringster Lageenergie einzunehmen, ist die Ausrichtung der Partikelfläche vornehmlich als horizontal und die Spandicke als vertikal im Spankuchen anzunehmen.

Insbesondere die Länge und Dicke von Schneidspänen können über die Zerspanungsparameter gesteuert werden. So ist die Länge von beispielsweise Messerringzerspaner-Spänen durch die Länge der Hackschnitzel begrenzt. Im Fall einer schälenden Zerspanung (Messerwellenzerspaner, Langholz-Messerringzerspaner, Messerscheibenzerspaner) geben Vorritzmesser die Spanlänge vor. Die Spandicke ist über den Messerüberstand begrenzt.

Die Spanabmessungen lassen sich mit verschiedenen Messtechniken und Verfahren quantifizieren. Gängige Messtechniken sind das manuelle Ausmessen unter Verwendung von Messschieber und Dickentaster oder die Bildanalyse, bei der zwischen statischen (ISO 13322-1: 2014-05) und dynamischen (ISO 13322-2: 2006-10) Systemen unterschieden wird. Im Fall der Bildanalyse lassen sich Spanlänge und -breite auf verschiedene Art und Weise bestimmen, wie z. B. nach dem Verfahren des kleinsten begrenzenden Rechtecks, des Feret-

Durchmessers<sup>21</sup> oder des längsten direkten Weges innerhalb der Partikelkontur zwischen den entgegengesetzten Enden.

#### 2.3.3 Spanform

Die Form von Spänen lässt sich mit Hilfe von Adjektiven (z. B.: gekrümmt, flächig, ...) qualitativ beschreiben, wobei diese häufig auf dem Vergleich mit bekannten zwei- und dreidimensionalen geometrischen Figuren basieren (stäbchenförmig, quaderförmig, ...). Numerisch quantifizieren lässt sich die Form eines Körpers über Formfaktoren (Formparameter). Ein bekannter Formfaktor für Holzpartikel ist der Schlankheitsgrad<sup>22</sup> (Aspekt- oder Seitenverhältnis)<sup>23</sup>, der als Quotient von Länge und Dicke berechnet wird (Niemz und Wenk 1989). Analog ist das Breitenverhältnis (Quotient von Länge und Breite) sowie die Plattheit (Verhältnis von Partikelbreite zu Partikeldicke) zu berechnen (Niemz und Wenk 1989). Mit voranschreitender Ausreifung bildanalysebasierter Partikelcharakterisierungssysteme wird es zunehmend einfacher, Formfaktoren zu berechnen, die sich von den manuell bestimmbaren Längenmaßen als Basis geometrischer Proportionskenngrößen lösen und auf anderen (Mess- oder auf Basis dieser abgeleiteten) Werten basierend deren Verhältnisse zueinander angeben. Wenn auch spanformbezogene Fragestellungen eigentlich einen räumlich-dreidimensionalen Ansatz erfordern, so ist aufgrund des Stands der wirtschaftlich-sinnvoll einsetzbaren Technik (zweidimensionale bildanalysebasierte Partikelvermessung) eine Fokussierung auf Formfaktoren empfehlenswert, die auf der Schattenprojektion (Abbild, Silhouette) des Partikels basieren. Diesem Umstand tragen auch die Regeln und Nomenklaturen für die Beschreibung und quantitative Darstellung der Form von Partikel in DIN ISO 9276-6:2012-01 Rechnung, in der weitestgehend Definitionen für zweidimensionale Ansätze gegeben werden. Eine Klassifizierung der zur Berechnung von Formfaktoren herangezogenen Werte lässt sich ihrem Ursprung nach vornehmen. So kann zwischen Werten unterschieden werden, die direkt am Schattenbild des untersuchten Partikels bzw. eines idealen geometrischen Körpers ermittelt wurden (Länge, Breite, Umfang, Projektionsfläche, ...) und solchen, die eine physikalische Eigenschaft des vermessenen Partikels (Projektionsfläche, Umfang, ...) als Abmessung (Länge, Breite, Durchmesser, ...) eines idealen geometrischen Körpers äquivalenter Eigenschaft angegeben. Formfaktoren lassen sich ihrerseits in Anlehnung an Barrett (1980) danach unterscheiden, auf welcher Größenebene sie die Morphologie von Partikeln beschreiben. Neben (1) den geometrischen Proportionen (Makroform) lassen sich auch (2) die Rundheit (Mesoform) sowie die Oberflächenstruktur (Mikroform) beschreiben.

#### 2.3.4 Spangröße nach Siebanalyse

Die Größencharakterisierung von Spänen für die Spanplattenherstellung wird in der industriellen Praxis vornehmlich über die Siebanalyse realisiert, deren Grundlagen in DIN 66165-1: 2016-08 behandelt werden. Hierbei findet insbesondere das Verfahren F - Maschinensiebung mit bewegtem Einzelsieb oder Siebsatz in gasförmigem, ruhendem Fluid - Einsatz. Die Anwendung der Siebanalyse zur Größencharakterisierung von Spänen ist naheliegend, da in der industriellen Praxis die Separierung des erzeugten Spangutes in Deck- und Mittelschicht-Spanfraktion - neben Windsichtern und Scheibensieben - über Rüttel-, Schwing- und

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Abstand zwischen zwei parallelen Geraden im beliebigen Winkel zur Partikellängsausrichtung, die die Kontur des Partikels an je einer Seite tangieren

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> engl. slenderness ratio/ degree of slenderness

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> engl. aspect ratio

Taumelsiebe (Deppe 2003) vorgenommen wird. Die Siebanalyse liefert als Ergebnis die Spangröße als Maschenweite, die ein kombiniertes Merkmal aus Spanabmessungen und Spanform ist.

Bei der Siebanalyse wird eine Probe eines Spanmaterials mit einer Kaskade<sup>24</sup> von Analysesieben (Siebturm) klassiert, der jeweilige Siebrückstand durch Wägung bestimmt und aus der Verteilung der ermittelten Massenanteile über die Maschenweiten die Spangröße ermittelt. Die Spangröße ist ein aus Spanabmessungen und Spanform kombiniertes Spangeometrie charakterisierendes Merkmal, da zum Passieren eines Siebbodens sowohl zwei der drei Spanhauptachsen kleiner als die entsprechende Maschenweite sein müssen als auch die Spanform ein Passieren zulassen muss. Folglich handelt es sich bei jeder erhalten Fraktion um ein Spektrum von Spänen unterschiedlicher Geometrie, deren Gemeinsamkeit darin besteht, von einem Siebboden gleicher Maschenweite zurückgehalten worden zu sein. Dennoch weisen Dunky und Niemz (2002) auf die Möglichkeit der korrelativen Abschätzung dieser Spanabmessungen aus der Spangröße hin, da die Klassierung bei der Siebanalyse vorwiegend nach Spanlänge und -breite (May 1973) erfolgt. Eine Auftrennung des Spanmaterials nach der Spandicke erfolgt laut May (1973) hingegen vorwiegend im Rahmen der Windsichtung, also einer Separierung nach Masse, Dichte und Strömungswiderstand der Partikel.

# 2.3.5 Diversität der Spangeometrie innerhalb eines Spanmaterials und dessen qualitative Charakterisierung mittels Häufigkeits- bzw. Mengenverteilung

"Wird Holz zu Holzspänen zerspant, so entsteht immer ein Gemisch aus Spänen verschiedener Größen, Form und Abmessungen" (Dunky und Niemz 2002, Seite 664). Erklärungsansätze hierfür lassen sich aus den Details verschiedener Prozessschritte sowie der Struktur des Holzes herleiten. So ist beispielsweise bei der Herstellung von Hackschnitzeln mit einem Trommelhacker (rotierendes Werkzeug<sup>25</sup> mit großer Schnitttiefe) davon auszugehen, dass die Spanabtrennung praktisch in keinem Moment allein in einer der Hauptschnittrichtungen (Hirnschnitt, Längsschnitt, Querschnitt) erfolgt, sondern eine mehr oder minder stark ausgeprägte Kombination von Hirn- und Längsschnitt – mit entsprechenden Auswirkungen auf den Faserverlauf in den Hackschnitzeln – vorliegt (Abbildung 6). Aufgrund der Struktur des Holzes (zylindrische Stammform, konzentrischer Verlauf der Zuwachszonen, axiale und radiale Orientierung der Zellen, individuelle Wuchsform) muss sich die innere Struktur der Hackschnitzel (Faserverlauf zur Längsachse, Dichteverteilung aufgrund unterschiedlich angeschnittener Zuwachszonen) und damit deren Festigkeitsverteilung trotz aller äußerlicher Ähnlichkeit unterscheiden. Neben den Details der Vorzerkleinerung (z. B. Einzugsgeschwindigkeit der Stämme und Maschenweite der Siebplatte im Trommelhacker) sowie der nachgelagerten (Messerring-) Zerspanung (z. B. Messerüberstand) bestimmt diese Strukturvielfalt das Bruchverhalten beim prozessinternen Transport (unbeabsichtigte Nachzerkleinerung) und dürfte ein Grund für die Diversität der Spangeometrie sein.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> mit von oben nach unten stufenweise abnehmender Maschenweiten

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> stetige Veränderung der Bewegungsrichtung der Schneiden



Abbildung 6: Schematische Darstellung zur Erklärung der Schnittrichtungen bei Holz (Gottlöber 2014) sowie der holzanatomischen Richtungen, Abbildung der Hackrotortrommel entliehen auf www.hombak.com<sup>26</sup>

Zur qualitativen Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften eines Spanmaterials bzw. dessen Diversität werden die Ergebnisse von Spangrößenanalysen (Siebanalyse, händische Spanvermessung mittels Messschieber und Dickentaster, Bildanalyse, ...) neben der Berechnung von Kennwerten (z. B. Mittelwert der Spanlänge) als Häufigkeits- bzw. besser Mengenverteilung zur Auswertung aufbereitet. Besser Mengenverteilung, da als Mengenart nicht allein die Anzahl von Spänen bestimmter Merkmalsausprägungen, sondern auch eine kumulierte Strecke (z. B. Summe der Spanlänge), Fläche, Volumen oder Masse (wie beispielsweise bei der Siebanalyse) von Spänen bestimmter Eigenschaft herangezogen werden kann. Grundsätzlich wird aber die Verteilung der Spaneigenschaft, auf die untersucht wurde (x-Achse, unabhängige Variable), über die Menge der gewählten, abhängigen Variablen (y-Achse) ausgedrückt. Details der in DIN ISO 9276-1: 2004-09 beschriebenen Regeln für die graphische Darstellung von Partikelgrößenanalysedaten werden in Kapitel 3 näher erklärt.

#### 2.3.6 Schüttdichte als Indikator der Partikelgeometrie

Die Schüttdichte (in kg/m<sup>3</sup>) eines Spanmaterials ist definiert als das Verhältnis der Masse zum Volumen einer Probe, das diese nach dem Streuen einnimmt (Streudichte). Bei konstanter Feuchtigkeit und Rohdichte des Holzes steht die Schüttdichte mit der Spangeometrie in Zusammenhang, wobei die Schüttdichte logischerweise mit zunehmend voluminöser Spanform abnimmt und mit zunehmender Kompaktheit der Späne steigt. Die Schüttdichte kann bei Verwendung des gleichen Ausgangsmaterials (Holzart bzw. Holzdichte) folglich als Indikator dafür herangezogen werden, ob bei variierter Spanerzeugung unterschiedliche Spangeometrien erzielt wurden. Die Schüttdichte wurde beispielsweise von Grigoriou (1981) zur Spancharakterisierung herangezogen. Im Kontext der Untersuchung der Herstellung eines federelastischen Spangutes geringer Dichte für Schüttdämmstoffe, plattenförmige Dämmstoffe und leichte Spanplatten zogen beispielsweise Tröger und

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> URL: https://www.hombak.com/Trommelhacker.html, Broschüre Trommelhacker (Abrufdatum: 18.10.2021)

Groß (2010) die Setzungsdichte (Schüttdichte unter Last) als Kenngröße zur Beurteilung der Zielerreichung (voluminöses Spangut) durch Veränderung der Zerspanungsparameter heran.

#### 2.3.7 Geometrie von Spänen für die Spanplattenherstellung

Späne für die Spanplattenherstellung können in vereinfachter Weise als quaderförmige, flächige Partikel mit im Allgemeinen drei unterschiedlichen Seitenlängen beschrieben werden (Dunky und Niemz 2002). Deckund Mittelschichtspäne unterscheiden sich vornehmlich in ihren Abmessungen, wenn keine getrennte Zerspanung stattfindet und das erzeugte Spangut über Siebe in Deck- und Mittelschichtmaterial fraktioniert wird. Eine skizzierte Darstellung der geometrischen Eigenschaften typischer Späne für die Spanplattenherstellung wird in Abbildung 7 wiedergegeben, eine Zusammenstellung zufällig ausgewählter, einzeln abgelichteter Mittelschichtspäne zeigt Abbildung 8.



Abbildung 7:Skizzierte Darstellung der geometrischen Eigenschaften typischer Späne für die Spanplat-<br/>tenherstellung: (1) Deckschicht-Feinspan, (2) Mittelschichtspan, (3) Schlagspan (Zusam-<br/>menstellung aus Abbildung 4.17, Dunky und Niemz 2002).



Abbildung 8:Fotografien zufällig ausgewählter Mittelschichtspäne (Bildquelle: Thünen-Institut für<br/>Holzforschung) mit Zentimetermaßstab.

Eine Übersicht der Spanne von Abmessungen, Schlankheitsgrad und Schüttdichte typischer Spansortimente ist bei Dunky und Niemz (2002, Seite 105) zu finden; eine Auswahl der Angaben ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Zu beachten ist, dass in der Quelle weder Angaben zur Urquelle, noch dem Messmittel gemacht werden sowie nicht für jede Spanart eine Angabe der geometrischen Kenngröße gemacht wurden. Die Angaben müssen folglich als Richtwerte verstanden werden, die einer groben Orientierung dienen.

Plattenschicht/	Spanlänge l	Spanbreite b	Spandicke d	Schlankheitsgrad λ = I / d	Schüttdichte
Spanart	(mm)	(mm)	(mm)	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )
Deckschicht					
Feinspäne	3 - 6	-	0,1 - 0,25	15 - 40	120 - 180
Normalspäne	5 - 10	-	0,2 - 0,3	20 - 50	60 - 120
Mittelschicht					
Einheitsspäne	8 - 15	1,5 - 3,5	0,25 - 0,4	30 - 60	40 - 140
Schneidspäne	8 - 15	2 - 4	0,4 - 0,6	20 - 40	48 - 180
Schlagspäne	8 - 15	1,5 - 3,5	0,5 - 2	5 - 50	100 - 180

Tabelle 1:Auswahl an Spannen geometrischer Kenngrößen typischer Späne (zusammengestellt aus<br/>Tabelle 4.4, Dunky und Niemz 2002).

Die Abmessungsangaben aus Tabelle 1 werden mit Abbildung 9 veranschaulicht, wobei jeweils die minimalen und maximalen Angaben für jeweils Deck- und Mittelschichtspäne herangezogen und - zur Vervollständigung - die Breite von Deckschichtspänen (0,3...1,3 mm) aus den Ergebnissen eigener Siebanalysen von Spänen drei verschiedener Plattenhersteller (Benthien und Ohlmeyer 2016) abgeleitet wurden (Mittelwerte von jeweils dem 10 %-Quantil x<sub>10</sub> und 90 %-Quantil x<sub>90</sub><sup>27</sup>). Dass die Spangröße nach Siebanalyse als Spanbreite angenommen werden kann, wurde von Benthien et al. (2019b) gezeigt. Die zur Überprüfung des Vorgehens in gleicher Weise berechnete Spanne der Mittelschichtspanbreite (1...5,2 mm<sup>28</sup>) passt zu den Angaben von Dunky und Niemz (2002).

 <sup>&</sup>lt;sup>27</sup> x<sub>10</sub>: (DS A) 0,40 mm, (DS B) 0,24 mm, (DS C) 0,29 mm; x<sub>90</sub>: (DS A) 1,43 mm, (DS B) 1,62 mm, (DS C) 0,94 mm
<sup>28</sup> x<sub>10</sub>: (MS A) 1,12 mm, (MS B) 1,11 mm, (MS C) 0,83 mm; x<sub>90</sub>: (MS A) 5,01 mm, (MS B) 3,93 mm, (MS C) 6,73 mm



# Abbildung 9: Spanne der Abmessungen von Deck- (DS) und Mittelschichtspänen (MS) (Dunky und Niemz 2002, Benthien und Ohlmeyer 2016) sowie Durchmesser von Tracheiden (Sperry et al. 2006) (logarithmisch skalierte Abszisse) (Benthien et al. 2022)

Eine Vorstellung der Spangröße typischer Späne kann weiter aus Versuchen gewonnen werden (Benthien et al. 2018, Benthien et al. 2019a), in denen - in Anlehnung an die bei Projektpartnern aus der industriellen Praxis verwendeten Siebmaschenweiten - der Deckschichtspan FL<sup>29</sup> Hom<sup>30</sup> mit einem Sieb der Maschenweite 1,25 mm vom Mittelschichtspan CL<sup>31</sup> Hom getrennt wurde, d. h. der Deckschichtspan eine Spangröße von < 1,25 mm, der Mittelschichtspan eine Spangröße von > 1,25 mm hat bzw. Mittelschichtspäne mit Sieben der Maschenweiten 1,5 mm und 8 mm vom Gesamtspan abgetrennt wurden, d. h. der Mittelschichtspan eine Spangröße von > 1,5 mm bis < 8 mm hat.

#### 2.4 Interpartikuläre Klebverbindungen

Das Beaufschlagen der Späne mit Klebstoff erfolgt mittels verschieden ausgestalteter Leimmischer, in denen der Klebstoff in der Regel als Sprühnebel eingebracht wird. Entsprechend der technischen Details wird die Spanoberfläche so mit Klebstofftröpfchen unterschiedlicher Größe und Verteilung benetzt. Durch Kontakt zwischen den Spänen wird der Klebstoff weiter verteilt (Wischeffekt).

Die sich beim Streuen der Spanmatte ergebenden Kontaktstellen zwischen den Spänen sind in Abhängigkeit der Details der Klebstoffapplikation (Tröpfchengröße und -verteilung, Umfang der Nachverteilung) mit Klebstoff versehen sowie entsprechend der vorliegenden Spangeometrie mehr oder weniger groß und punktförmig. Im Zuge des Pressvorgangs wird die Spanmatte verdichtet, weitere Kontaktstellen entstehen, die Kontaktflächen zwischen den Spänen gewinnen aufgrund der örtlichen Komprimierung der Holzsubstanz an Größe und es kommt zur Ausbildung belastbarer Klebstoffverbindungen (soweit Klebstoff hier vorhanden) zwischen den Spänen. Die Verbindung der Späne untereinander ist Voraussetzung dafür, dass die Späne in ihrer Gesamtheit als Werkstoff zusammenwirken können. Sind alle übrigen Parameter konstant, bestimmt

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> FL = face layer (Deckschicht)

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Hom = Hombak-Messerwellenzerspaner

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> CL = core layer (Mittelschicht)

die Summe der Klebstoff-Verbindungsflächen das Eigenschaftsniveau der Spanplatte. Die Ausbildung der Größe der einzelnen Kontaktflächen im Zuge der Verdichtung ist von dem individuellen Zusammenspiel aus wirkender Kraft, Kontaktfläche und Verdichtungswiderstand abhängig, wobei Kraft, Kontaktfläche und Verdichtung Veränderungen unterworfen sind.

#### 2.5 Verdichtungswiderstand

Als Verdichtungswiderstand ist der Gegendruck zu verstehen, den ein Span seiner oder eine Spanmatte ihrer Verdichtung entgegensetzt. In Abhängigkeit der Holzart (d. h. deren Struktur), aus der das Spanmaterial hergestellt wurde, der Geometrie des Spans bzw. der Späne und deren Orientierung in der Spanmatte (Winkel der longitudinalen holzanatomischen Richtung zur Plattenebene) sowie der Struktur und der Klebstoffrezeptur der Spanmatte, kann der Verdichtungswiderstand unterschiedlich sein. Weiter haben Feuchte und Temperatur Einfluss auf den Verdichtungswiderstand (Plath und Schnitzler 1974, Dunky und Niemz 2002). Mehrlagige Matten aus Spänen unterschiedlicher Eigenschaften (Holzart, Geometrie, Feuchte) können folglich unterschiedliche Verdichtungswiderstände über den Mattenquerschnitt aufweisen. Gleiches gilt für die Spanorientierung sowie bei Heißverpressung, da die Späne hier aufgrund des Temperaturgradienten über den Plattenquerschnitt unterschiedlich stark plastifizieren (erweichen).

Bei homogen aufgebauter Spanmatte und ohne, dass weitere Einflüsse bestehen, liefert der Verdichtungswiderstand Information darüber, welche Dichte bei gegebenem Pressdruck erreicht wird bzw. welcher Pressdruck für das Erreichen einer bestimmten Dichte erforderlich ist. Liegen über den Mattenquerschnitt Schichten unterschiedlichen Verdichtungswiderstands vor, ist die individuelle Verdichtung das Resultat des sich wechselseitig beeinflussenden Verhaltens der Schichten auf den von außen einwirkenden Pressdruck.

Zur Quantifizierung der "Verformbarkeit eines Spangemisches" (inverse Definition des Verdichtungswiderstandes) bei gewähltem Pressdruck führte Grigoriou (1981) die Kennzahl der (Span-) Kompressibilität ein. Versuche zur Bestimmung des Verdichtungswiderstandes von Spänen bzw. Spanmatten führten Sosnin (1974) und Haas und Frühwald (2000) durch. Während Sosnin (1974) den Einfluss des Verdichtungsgrades und der Verdichtungsgeschwindigkeit auf den Gegendruck der Spanmatte untersuchte, so variierten Hass und Frühwald (2000) Klebstoffanteil, Verdichtungsgeschwindigkeit, Feuchte und Temperatur und beobachteten deren Einfluss auf den Verdichtungswiderstand. Anhand der Untersuchung von Span- und Strandmatten konnten Haas und Frühwald ergänzend zeigen, dass der Verdichtungswiderstand von großen Spänen (Strands) denen von kleinen Spänen (Spanplattenspänen) bei Mattendichten über 300 kg/m<sup>3</sup> übersteigt. Bis zu einer Temperatur von 110 °C wurde dies auch für Mittelschichtspäne (groß) und Deckschichtspäne (klein) festgestellt. Der Einfluss der Verdichtungsgeschwindigkeit auf den Verdichtungswiderstand wurde, anders als von Sosnin (1974), als gering festgestellt.

Nach Sosnin (1974) findet bei der Verdichtung einer Spanmatte zunächst eine Annäherung der Partikel untereinander und erst im weiteren Verlauf eine Komprimierung des Spans an den Kontaktstellen statt. Die Annäherung der Partikel untereinander sowie die Formveränderung von voluminösen Partikeln zu Beginn der Verdichtung ist nach Niemz et al. (1988) als eine Veränderung der makroskopischen Spanmatten- bzw. Plattenstruktur (poröses Gitternetzwerk aus sich überlappenden und kreuzenden Partikeln) zu verstehen. Im Fall der Spanverdichtung, so weiter Niemz et al. (1988), wird hingegen die mikroskopische Porenstruktur des Holzes, also die Holzzellen selbst verdichtet. Auf submikroskopischer Strukturebene (Zellwandsubstanz) finden im Zuge der Verdichtung keine Veränderungen statt. Der Verdichtungswiderstand entspricht somit zunächst dem Druck, der aufgewendet werden muss, um die Partikel einander anzunähern. Hierbei findet insbesondere bei voluminösen Spänen eine Formveränderung der Späne statt. Im weiteren Verlauf der Verdichtung entspricht der Verdichtungswiderstand (idealisiert betrachtet) dem Druck, der für die Verdichtung der Holzsubstanz an den Kontaktstellen zwischen den Spänen nötig ist. Klar ist, dass der Verdichtungswiderstand, je nach Fortschritt der Verdichtung, eine Kombination des Verdichtungswiderstandes aus Formveränderung der Späne und Verdichtungsgrad der Holzsubstanz sein muss.

#### 2.6 Spanorientierung

Entsprechend dem Bestreben, den Zustand geringster Lageenergie einzunehmen, sind Späne nach der Streuung vornehmlich horizontal, d. h. in Plattenebene liegend ausgerichtet. Das bedeutet, dass die Verdichtung der Späne in radialer bzw. tangentialer holzanatomischer Richtung, d. h. quer zur Faser erfolgt.

Wird jedoch so gestreut, dass die Späne im Spankuchen vertikal orientiert sind, wirkt die eingeleitete Kraft zur Verdichtung in longitudinaler Holzrichtung. Die Idee, dass der Verdichtungswiderstand von vertikal orientierten Spänen den von horizontal orientierten Spänen übersteigt, damit die Mittelschichtspäne eine geringere Verdichtung und die Deckschichtspäne eine größere Verdichtung erfahren, basiert auf der unterschiedlichen Belastbarkeit von Holz quer und längs zur Faser. So beträgt die Druckfestigkeit von z. B. Nadelschnittholz (Festigkeitsklasse C24) parallel zur Faser ( $f_{c,0,k}$ ) 21 N/mm<sup>2</sup>, die Druckfestigkeit parallel zur Faser ( $f_{c,90,k}$ ) nur 2,5 N/mm<sup>2</sup> (Anonymous 2019).

Unbeachtet bleibt bei dieser Vorstellung, dass schlanke, auf Druck belastete Späne vor dem Überschreiten der Druckfestigkeit ausknicken würden und somit nicht die Druckfestigkeit, sondern die Knickfestigkeit entscheidendes Kriterium wäre. Weiter ist klar, dass die vertikale Orientierung eine Idealvorstellung ist. Praktisch wird die Längsachse der Späne nie exakt vertikal ausgerichtet sein oder im Zuge der Verdichtung bleiben, sodass es zu einem Kippen und damit nur teilweisen Belastung der Späne in Faserrichtung kommt.

Neben der Erwartung, dass Spanplatte mit vertikal orientierten Mittelschichtspänen aufgrund einer stärkeren Verdichtung der Deckschichten höhere Biegeeigenschaften aufweist, ist für eine so strukturierte Platte von erhöhter Querzugfestigkeit auszugehen. Schließlich übersteigt die Zugfestigkeit in Faserrichtung die Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung (Nadelschnittholz, Festigkeitsklasse C24, parallel zur Faser,  $f_{t,0,k} = 14,5 \text{ N/mm}^2$ , quer zur Faser,  $f_{t,90,k} = 0,4 \text{ N/mm}^2$ ) (Anonymous 2019).

Vor dem Hintergrund, die Eigenschaften von Spanplatten durch geeignete Herstellungsverfahren zu beeinflussen und so den jeweiligen Anforderungen anzupassen, erprobte May (1974) die "Spanmattenformierung senkrecht zur Pressrichtung" und untersuchte die Eigenschaften des resultierenden Plattenwerkstoffes (einschichtige Spanplatten mit vertikal orientierten Spänen). Es wurde gezeigt, dass die Querzugfestigkeit über die veränderte Streuung um "ca. 30 %" gesteigert werden konnte. Ausblickend wird darauf hingewiesen, dass eine Verbesserung der Biegeeigenschaften der hergestellten Platten durch Beplankung (mit lasttragenden Deckschichten) mit vergleichsweise geringem Aufwand zu erreichen sein könnte.

#### 2.7 (Roh-) Dichte

Als Rohdichte ist der Quotient aus Masse und dem Volumen des makroskopischen Holzes einschließlich des Porenraums definiert (DIN 1306:1984-06). Diese Festlegung ist auf Holzwerkstoffe zu übertragen, wobei hier (DIN EN 323:1993-08) die Probenmasse (Summe aus Holz, Klebstoff und Additiven) herangezogen wird. Da die Masse und das Volumen von Holz von dessen Feuchte<sup>32</sup> abhängen, ist die Dichte an klimatisierten Proben (Gewichtskonstanz) zu bestimmen und unter Nennung der Holzfeuchte anzugeben (DIN 52182:1976-09). Da die Holzfeuchte ihrerseits, das spezifische Sorptionsverhalten der Holzart sowie die Details der Klimatisierung (Startpunkt, Desorption, Adsorption) sind zu berücksichtigen, vom Umgebungsklima abhängt, lassen sich alternativ zur Holzfeuchte auch die Klimabedingungen angegeben. Anstelle der Angabe der Rohdichte bei 12 % Holzfeuchte, also die Rohdichte bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte. Bei Holzwerkstoffen wird normativ stets bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit klimatisiert. Bei Angabe der Feuchte handelt es sich hier nicht um die Holzfeuchte, sondern die Prüfkörperfeuchte (DIN EN 322:1993-08), da nicht allein auf die Holzmasse, sondern die Prüfkörpermasse bezogen wird. Die wesentlichen Elemente der normativen Vorgaben zur Rohdichtebestimmung sind grundlegend und lassen sich auf die Bestimmung der Verteilung der Dichte quer zur Plattenebene übertragen.

#### 2.8 Rohdichteprofil

Die ungleiche, aber symmetrische Verteilung der Dichte senkrecht zur Platteneben wird u. a. bei Spanplatte als Rohdichteprofil bezeichnet. Das charakteristische Erscheinungsbild dieses Rohdichteprofils ist von Deckschichten hoher und einer Mittelschicht niedriger Dichte gekennzeichnet. Die Dichteunterschiede zwischen den Schichten sind entsprechend der Gegebenheiten unterschiedlich stark ausgeprägt; die Übergänge zwischen den Schichten sind mehr oder weniger fließend. Ursachen für die Ausbildung des Rohdichteprofils lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- mehrschichtiger Aufbau der Spanmatte aus unterschiedlichen Spanmaterialien bzw. ungleiche Verteilung der Spangröße (aufgrund der Details der Streuung) und damit unterschiedlicher Schüttdichte und Verdichtungswiderstand über den vertikalen Plattenquerschnitt
- Parameter des Pressprozesses: Verdichtungsgeschwindigkeit und Presstemperatur
- ungleiche Verteilung von Klebstoff und Feuchte quer zur Plattenebene

Eine zügige Heißpressung der Spanmatte hat ein Rohdichteprofil hoher Deck- und geringer Mittelschichtdichte zur Folge, da zunächst das Deckschichtmaterial plastifiziert und sich so leichter verdichten lässt. Das Mittelschichtmaterial ist hingegen zu Beginn des Pressvorgangs noch kalt und setzt dem Verdichtungsdruck noch den ursprünglichen Verdichtungswiderstand entgegen. Eine erhöhte Spanfeuchte bewirkt eine Verringerung des Verdichtungswiderstandes.

Im Fall mehrlagiger Matten aus Spänen unterschiedlicher Eigenschaften liegen unterschiedliche Verdichtungswiderstände über den Mattenquerschnitt vor. Unter anderem lässt sich auch hieraus die Ausbildung eines Dichteprofils über den Plattenquerschnitt erklären, wenn auch vornehmlich die sich während des Heißpressprozesses verändernde Spanfeuchte und Temperatur über den Mattenquerschnitt (feuchte- und temperaturinduzierte Plastifizierung) und die damit verbundene Veränderung des Verdichtungswiderstandes ursächlich ist.

Als Referenz, in der die Effekte der Einflussparameter auf die Ausbildung des Rohdichteprofils untersucht wurden, wird die Arbeit von Hänsel et al. (1988) genannt. Als Quelle für den Versuch, die Einflussparameter

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> DIN 52183:1977-11;  $u = (m_u - m_0) / m_0 \ge 100$  wobei u = Holzfeuchte,  $m_u =$  Masse der feuchten Holzprobe,  $m_0 =$  Masse der darrtrockenen Probe

in ein Modell zur Berechnung der maximalen Dichtedifferenz zu überführen, wird auf Mihailova und Tritchkov (2009) verwiesen.

## 2.9 Einfluss der Dichte auf die mechanischen Platteneigenschaften

Mit der Dichte stehen die mechanischen Eigenschaften von Spanplatte in positivem Zusammenhang. Als Belege hierfür sind Dunky und Niemz (2002) oder Istek und Siradag (2013) anzuführen. Nähere Angaben für die Biegefestigkeit sind bei Klauditz und Stegmann (1957) sowie Plath (1963) zu finden, für den Elastizitätsmodul bei Keylwerth (1959) und für die Querzugfestigkeit bei Liiri (1961).

# 2.10 Effekt der Rohdichteverteilung auf die Biegeeigenschaften von Spanplatte

Vergleichbar mit einem funktionsoptimierten, mehrschichtigen Verbundwerkstoff (Sandwichplatte mit lasttragenden Deckschichten und einem Kern geringer Dichte) sorgt die ungleiche Verteilung der Dichte über den Querschnitt von Spanplatte dafür, dass verschiedene mechanische Eigenschaften die ihres homogen strukturierten (hypothetischen) Pendants übertreffen (Beplankungseffekt). Das wird insbesondere am Beispiel der Biegeeigenschaften deutlich: Während mit zunehmender Entfernung von der Mitte der Mittelschicht bei Belastung die Biegespannungen zunehmen, liegen gleichzeitig mit zunehmender Entfernung von der Mitte der Mittelschicht - aufgrund der zunehmenden Dichte - örtlich ein größeres (Zug- bzw. Druck-) Elastizitätsmodul und eine höhere (Zug- bzw. Druck-) Festigkeit vor. Unter ansonsten gleichen Parametern (Eigenschaft, z. B. Werkstoffdichte; Gegebenheiten, z. B. Belastung) sorgt die vorliegende Verteilung der Dichte so dafür, dass es zu einer geringeren Durchbiegung (als beim hypothetischen Pendant) kommt und eine größere Differenz zwischen Biegespannung und Biegefestigkeit vorliegt.

# 2.11 Einfluss von Spanabmessungen und Spänen innovativer Form auf die Platteneigenschaften

Während auf den ersten Blick in der Literatur zahlreiche Beiträge zum Einfluss der Partikelgeometrie (Größe und Form) auf die Eigenschaften von Spanplatten zu finden sind, werden bei näherer Betrachtung nicht immer Spanplatten im engeren Sinne, sondern z. B. mineralisch gebundene Spanplatten, Spanplatten aus landwirtschaftlichen Reststoffen (Stroh) oder Platten aus Strands (OSB) betrachtet.

In Kollmann (1966) führt Teichgräber die geometrischen Verhältnisse der verleimten Späne als Einflussgröße auf die Eigenschaften von Spanplatten auf und belegt dies mit Arbeiten von Turner (1954), Kitahara und Kasagi (1955), Post (1958) und Brumbaugh (1960). Dunky und Niemz (2002) stellten die Ergebnisse verschiedener Studien zum Zusammenhang von Spangeometrie und Platteneigenschaften tabellarisch zusammen (Tabelle 2). Von Dunky und Niemz nicht aufgeführte Ergebnisse von Turner (1954) sowie Kitahara und Kasagi (1955) lassen sich wie folgt zusammenfassen: maximale Biegefestigkeit bei einer Spandicke von 0,46 mm (0,018 Inch), Anstieg der Biegefestigkeit für Platten mit einem Klebstoffanteil von 4 % bei steigender Spanlänge (Turner) und Absinken der Biegefestigkeit bei gleichzeitiger Vergrößerung von Spanlänge, -breite und - dicke (Kitahara und Kasagi).

# Tabelle 2:Einfluss der vergrößerten Spanabmessung (Länge oder Dicke) auf die Eigenschaften ein-<br/>schichtiger Laborspanplatten (verändert nach Dunky und Niemz 2002)

Vergrößerte Abmessung/				
Platteneigenschaft		veranderung	Quelle	
Spanlänge				
Biegefestigkeit		steigt	Liiri et al. (1977), Niemz (1982)	
Elastizitätsmodul		steigt	Niemz (1982)	
Querzugfestigkeit		Minimum bei mittlerer Spanlänge; steigt bei kürzeren Spänen stark an	Liiri et al. (1977)	
Dickenquellung		sinkt	Niemz (1982)	
Spandicke				
Biegefestigkeit	(1)	Minimum bei mittlerer Spandicke, ab- hängig von der Spanlänge	Liiri et al. (1977)	
	(2)	sinkt	Niemz (1982), Niemz und Schweitzer (1990), Post (1958)	
	(3)	abhängig von der Spanlänge, keine ein- deutigen Korrelationen	Brumbaugh (1960)	
Elastizitätsmodul		Maximum bei mittlerer Spandicke	Niemz und Bauer (1991)	
Querzugfestigkeit	(1)	steigt	Liiri et al. (1977)	
	(2)	Maximum bei mittlerer Spandicke	Niemz (1982)	
Dickenquellung	(1)	steigt	Liiri et al. (1977)	
	(2)	steigt leicht	Niemz (1982)	

Eine seither durchgeführte Studie untersuchte den Einfluss der Deckschicht- und Mittelschichtspangröße (als Ergebnis der Anwendung von Sieben unterschiedlicher Maschenweite) auf dreischichtige Testplatten (Istek et al. 2018). Die Ergebnisse zeigen eine nominale Zunahme der Biegefestigkeit, des Elastizitätsmoduls und der Dickenquellung mit zunehmender Deckschichtspangröße, jedoch ohne Angaben zur statistischen Absicherung. Außerdem wird bei den Mittelschichtspänen nicht nur die Maschenweite, sondern auch die Maschengeometrie verändert, so dass keine Aussage über die Veränderung der Spangröße getroffen werden kann.

#### 2.12 Hintergrund der ausgewählten Lösungsansätze

Der Ansatz, die Platteneigenschaften über eine stärkere Ausprägung des Dichteprofils, genauer eine Erhöhung der Deckschichteigenschaften über eine sich bei Verwendung von Mittelschichtspänen erhöhten Verdichtungswiderstandes einstellende Deckschichtdichte erreichen zu können, geht auf Ausführungen von Plath und Schnitzler (1974) zurück. Hiernach ist die Ausprägung des Rohdichteprofils (u. a.) vom Widerstand der Deck- und Mittelschichten abhängig, der beim Verdichten zu überwinden ist. So heißt es, dass zum Erreichen eines Rohdichteprofils mit möglichst großer Oberflächendichte der Verdichtungswiderstand der Deckschichten möglichst klein und der Verdichtungswiderstand der Kernschicht möglichst groß sein soll. Hierbei wird als einzig praktisch noch relevante Einflussgröße auf den Verdichtungswiderstand die Spanform genannt. Mit Verweis auf das Grundlagenpatent<sup>33</sup> von Fahrni wird weiter ausgeführt, dass dünne, flache Späne einen geringen Verdichtungswiderstand, dicke, unregelmäßig geformte Späne einen größeren Verdichtungswiderstand aufweisen. Ebenfalls ein größerer Verdichtungswiderstand wird verfilztem Spangut zugeordnet. Als Grund für den größeren Verdichtungswiderstand von dicken, unregelmäßig geformten Spänen wird auf die schräge und senkrechte Lage der Späne im Spanvlies hingewiesen. Von Hänsel et al. (1988) wird auf die steigenden "Rückstellkräfte" von Spänen mit steigender Dicke verwiesen, von Mihailova und Tritchkov (2009) darauf, dass sich Mittelschichtspäne großer Dicke für die Herstellung von Platten mit besonders ausgeprägtem Dichteprofil nutzen lassen.

Hinweise zum Potenzial von Spänen innovativer Form für die Herstellung holzreduzierter Spanplatte sind bei Tröger und Groß (2010)<sup>34</sup>, Schirp (2009) und Vos (2009) zu finden. Bei Tröger und Groß (2010) heißt es beispielsweise, dass sich Späne mit einer geringen Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form besonders für die Herstellung leichter Spanplatten eignen. Der hieraus vermutete (positive) Zusammenhang von voluminöser Spanform und Verdichtungswiderstand wird von der betonten Bedeutung von Schüttdichte und Verdichtungsverhältnis (definiert als das Verhältnis von Vliesdicke zur Plattendicke) gestützt, die ebenfalls im Schlussbericht von Schirp (2009) zur "Entwicklung einer extraleichten Spanplatte [...]" im Kontext der Suche nach der optimalen Spangeometrie aufgeführt wurde. In einer Arbeit zur "Entwicklung von leichten Holzwerkstoffen aus *Abies grandis* [...]" (Vos 2009) wird ebenfalls das so definierte Verdichtungsverhältnis betrachtet.

Dass über die Spangeometrie ein direkter Einfluss auf die Platteneigenschaften angenommen werden kann, erscheint beim Vergleich von Spanplatte und OSB besonders offensichtlich. OSB ist aus deutlich größeren Spänen aufgebaut und die mechanischen Platteneigenschaften (vornehmlich von Bedeutung die Biegeeigenschaften) übersteigen die von Spanplatte (DIN EN 300:2006-09 vs. DIN EN 312:2010-12). Aber auch aus dem von Wyss (1981) zitierten "Anspruch 1" des Patents von Fahrni (DBP 967328) aus der Zeit der Erfindung der Spanplatte wird der entscheidende Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften deutlich. So werden hier die Deckschichten aus dünnen, schuppenartigen Flachspänen bestehend und eine geschlossene, widerstandsfähige Oberfläche ausbildend beschrieben, wobei die so gestalteten Deckschichten wesentlich die funktionellen Eigenschaften der Platte sicherstellen, so Wyss weiter.

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> DBP 967328 von 1942

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Herstellung eines federelastischen Spangutes geringer Dichte als Matrix für [...] leichte Spanplatten
#### 3 Einheitlich eingesetztes Material und angewendete Methoden

#### 3.1 Späne, Bindemittel und Additive

Als Standard-Spanmaterial, sowohl für den Aufbau von Referenzplatten bzw. -schichten als auch Verdichtungsversuche, wurden Deck- und Mittelschichtspäne aus einer kommerziellen Spanplattenproduktion (Swiss Krono sp z o.o., Zary, Polen) eingesetzt. In Publikation III wurde dieses Werk mit dem Buchstaben A kodiert und folglich der Span als FL A<sup>35</sup> bzw. CL A<sup>36</sup> bezeichnet.

Wurden Spanplatten hergestellt, wurde als Klebstoff ein flüssiges Harnstoff-Formaldehyd<sup>37</sup>-Harz aus dem oben genannten Spanplattenwerk mit einem Feststoffgehalt von 67 % verwendet. Als Härter wurde dann eine 40 %-ige Ammoniumnitrat<sup>38</sup>-Lösung eingesetzt. Für die Beleimung der Deckschichtspäne wurde zusätzlich eine Paraffin-Emulsion sowie Harnstoff zugesetzt. Der Feststoffgehalt der Paraffin-Emulsion betrug 50 %.

#### 3.2 Spancharakterisierung

#### 3.2.1 Schüttdichte

Wurde die Schüttdichte bestimmt, dann stets als das Verhältnis der Masse locker in ein Becherglas (1 oder 2 Liter) geschütteter Späne zum Volumen.

#### 3.2.2 Siebanalyse

Wurde eine Charakterisierung des Spanmaterials mittels Siebanalyse (DIN 66165-1:2016-08) durchgeführt, dann an Proben, die bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit bis zur Gewichtskonstanz klimatisiert wurden. Durchgeführt wurde die Siebanalyse bei Deckschichtspanproben an 40 g Probenmaterial, bei Mittelschichtspanproben an 47 g Material. Je Spanmaterial wurde eine Dreifachbestimmung durchgeführt. Die Siebanalysen wurden auf einer Plan- bzw. Horizontalsiebmaschine (AS 400 Control, Retsch GmbH, Haan, Deutschland) durchgeführt. Die Siebdauer betrug 5 Minuten, die Drehzahl 240 U/min. Es wurden Analysesiebe mit einem Durchmesser von 200 mm eingesetzt. Die Maschenweiten bei der Siebung der Deckschichtspäne betrugen

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> kurz FL für engl. face layer (deut. Deckschicht)

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> kurz CL für engl. core layer (deut. Mittelschicht)

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> kurz UF für engl. urea-formaldehyde

<sup>38</sup> NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>

- 0,2 mm
- 0,315 mm
- 0,5 mm
- 0,63 mm
- 0,8 mm
- 1 mm
- 2 mm
- 3,15 mm

Die Maschenweiten bei der Mittelschichtspansiebung betrugen

- 0,8 mm
- 1 mm
- 1,6 mm
- 2 mm
- 3,15 mm
- 4 mm
- 5 mm
- 8 mm
- 11,2 mm
- 16 mm.

Auf die Anwendung von Siebhilfen zur Vermeidung von Anhaftungen und Verstopfen der Sieböffnungen wurde aufgrund der Gefahr einer Zerkleinerung des Siebgutes im Rahmen der Siebung verzichtet.

Die grafische Darstellung der Daten erfolgte in Anlehnung an DIN ISO 9276-1:2004-09 über Histogramme der Massenverteilungsdichte  $q_3(x)$  und der Massenverteilungssumme  $Q_3(x)$ .

Für die Histogrammdarstellung<sup>39</sup> wurde jede Masse der auf einem Sieb verbliebenen Späne (Siebrückstand) ins Verhältnis zur Summe der Massen aller Siebrückstände gesetzt (Ergebnis: relativer Anteil). Die relativen Anteile wurden weiter durch die jeweilige Größenklassenbreite dividiert und so die Verteilungsdichten erhalten (Säulenhöhe). Die Größenklassenbreite ist hierbei die Differenz der Maschenweite des Siebes, das der betrachtete Siebrückstand noch passieren konnte, und der Maschenweite des Siebes, das die betrachtete Siebfraktion zurückgehalten hat.

**Anmerkung:** Werden die relativen Anteile bzw. deren Prozentsätze nicht durch die Klassenbreite dividiert und als einfaches Säulendiagramm mit diskreter, nicht proportionaler Abszissenskalierung dargestellt, so finden weder die Stetigkeit der Partikelgröße, noch die Klassenbreite Berücksichtigung und die Säulenhöhe kann hinsichtlich der Bedeutung der Masse der Siebfraktion leicht über- bzw. unterinterpretiert werden. Sollen

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Säulendiagramm, bei dem die Säulen überganslos aneinandergrenzen, deren Breite die jeweilige Klassebreite und deren Höhe die Häufigkeitsdichte abbildet. Der Flächeninhalt der Säulen repräsentiert somit die relative Menge der Klasse, die Fläche unter dem Histogramm die Summe aller relativen Mengen, normiert zu 100 % oder eins.

mehrere Verteilungsdichte-Verteilungen vergleichend in einem Diagramm dargestellt werden, so kann anstatt eines Histogramms ein Punktdiagramm mit geraden Verbindungslinien zwischen den Datenpunkten erstellt werden, wobei für die Datenpunkte als x-Werte jeweils die Klassenmitte und als y-Werte die Verteilungsdichte-Werte herangezogen werden.

Als Datenbasis für die Verteilungssummendarstellung<sup>40</sup> wurden die Prozentsätze der zuvor kalkulierten relativen Massenanteile berechnet. Beginnend mit der kleinsten Partikelgröße wurden diese dann sukzessive summiert und so die Verteilungssummen (y-Wert) zu den Obergrenzen der jeweiligen Größenklassen (Maschenweite des Siebes, das der betrachtete Siebrückstand noch passieren konnte) (x-Wert) erhalten.

**Anmerkung:** Sowohl bei der Histogramm- (bzw. Punktdiagrammdarstellung der Verteilungsdichte) als auch der Verteilungssummendarstellung kann die logarithmische Skalierung der Abszissenachse insbesondere dann ein ruhiges Bild vermitteln, wenn die Abstufung der Siebmaschenweiten so gewählt wurde, dass sich bei logarithmischer Skalierung gleichbreite Säulen im Histogramm ergeben.

Da die Verteilungen der geometrischen Spaneigenschaften nicht allein deskriptiv (qualitativ) einander gegenübergestellt, sondern auch quantitativ unter Anwendung statistischer Methoden miteinander verglichen werden sollten, wurden numerische Kennwerte berechnet. Die mittlere Spangröße wurde als Summe der jeweiligen Produkte von relativem Massenanteil und Mitte zwischen den Klassengrenzen der Größenklasse berechnet. Als weitere Kennwerte wurden das 10 %-, 50 %- und 90 %-Quantil der Verteilungssumme berechnet. Zu verstehen sind diese Werte als theoretische Maschenweiten, bei denen 10 %, 50 % bzw. 90 % der Spanprobe den Siebboden passiert hätten. Berechnet wurden die Werte, indem– ausgehend von der kleinsten Partikelgröße – die Klassenbreiten solange aufaddiert wurden, bis 10% (D10), 50% (D50) oder 90% (D90) der gesamten Spanmasse erreicht waren. Wenn bis zum Erreichen der jeweiligen Quantile nur ein Teil einer Größenklasse relevant war, wurde zwischen den Klassengrenzen (Siebmaschenweiten) linear interpoliert. Da ein jedes Spanmaterial dreimal gesiebt wurde, kann die Standardabweichung als Maß für die Schwankungsbreite der Messwerte herangezogen werden. Auf dieser Basis wurden eventuelle Unterschiede der Spangröße statistisch untersucht.

#### 3.2.3 2D-Bildanalyse: Spanlängen- und -breitenmessung

Bei bildanalytischer Charakterisierung des Spanmaterials wurde zur Bildaufnahme ein Durchlichtscanner (Epson Perfection V750 Pro, Epson America Inc., Long Beach, CA, USA) verwendet. Die Auflösung der gescannten Bilder (16 bit-Graustufen) betrug 300 dpi bei einer Bildgröße von 254 mm mal 203,2 mm, was einer Pixelkantenlänge von 84,7 µm entspricht. Für die Bildverarbeitung wurde die Software FibreBench (Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, Szenenanalyse und Visualisierung, Hamburg, Deutschland, Version 1.7, Revision 1901) (Benthien et al. 2014) verwendet. Hierbei wurde der Algorithmus zur Faserverfolgung (Seppke et al. 2015) ausgeschaltet, so dass die Partikelabmessungen nur durch die Bildmomentmethode (Rechteckmodell) bestimmt wurden.

Wenngleich der bei der 2D-Spanvermessung erhaltene Datensatz grundsätzlich für jeden vermessenen Span eine Angabe zur Länge, Breite und Oberfläche umfasst und sich hieraus eine Vielzahl von Kennwerten (z. B.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Punktdiagramm mit geraden Verbindungslinien zwischen den Punkten. Eine durchgehende (kontinuierliche) Kurve der Verteilungssumme könnte mit Hilfe eines geeigneten Interpolationsalgorithmus berechnet werden.

Anzahl der Späne pro Gramm Spanmaterial, Breitenverhältnis, Oberfläche pro Gramm Spanmaterial) berechnen lässt, wurden in den Publikationen IV und V einheitlich der Mittel- und Maximalwert der Spanlänge sowie -breite angegeben, die Spanlängen- sowie -breitenverteilung (Verteilungsdichte und Summenverteilung) dargestellt und Kennwerte der Verteilungen (D10, D50, D90) berechnet. Die grafische Darstellung der Spanlängen- sowie -breitenverteilung erfolgte in Anlehnung an DIN ISO 9276-1:2004-09 über Histogramme der jeweiligen Verteilungsdichte  $q_1(x)$  und Verteilungssumme  $Q_1(x)$ .

Anmerkung: Anders als bei der Anzahlverteilung, bei der die Häufigkeiten von Merkmalsausprägungen einer definierten Spanne gegen ein Längenmaß aufgetragen werden, werden bei der Abmessungsverteilung die Summen der gemessenen Eigenschaftswerte aufgetragen. Im vorliegenden Fall also die Summen der Längen bzw. Breiten der jeweiligen Längen- bzw. Breitenklasse. Weitere Details des rechnerischen Vorgehens für die Histogramm- und Verteilungssummendarstellung entsprechen denen, wie sie bereits im vorherigen Kapitel 3.2.2 (Siebanalyse) beschrieben wurden.

Für die Einteilung der Längen- und Breitenmesswerte in Datengruppen wurden Längen- bzw. Breitenklassen erstellt, wobei die Breite der ersten Klasse sowohl für die Spanlänge als auch die Spanbreite auf 0,5 mm festgesetzt wurde. Die Breite der weiteren Abmessungsklassen wurde logarithmisch so vergrößert, dass sich folgende Obergrenzen ergeben: 0,5, 0,7, 0,98, 1,37, 1,92, 2,69, 3,76, 5,27, 7,38, 10,33, 14,46, 20,25, 28,35, 39,69 und 55,56 mm. Da für die Auswertung allein Späne mit einer Länge größer 1 mm berücksichtigt wurden, enthält erst die zweite Klasse (0,98-1,37 mm) Daten.

Der Mittelwert der Spanlänge (Spanbreite) wurde berechnet, indem die Summe aller Spanlängen (Spanbreiten) durch die Anzahl dividiert wurde. Das 10 %-Quantil (D10), das 50 %-Quantil (D50) und das 90 %-Quantil (D90) wurden auf Basis der Spanlängen- bzw. Spanbreiten-Verteilungssumme berechnet, d. h. das 10 %-Quantil gibt die Spanlänge bzw. -breite an, bei der im Zuge des Aufsummierens (der Spanlänge bzw. -breite in der nach aufsteigendem Wert sortierten Urliste) die Summe erreicht wird, die 10 % der Gesamtsumme entspricht. Analoges gilt für das 50 %- und 90 %-Quantil.

Da ein jedes Spanmaterial dreimal vermessen wurde, kann die Standardabweichung als Maß für die Schwankungsbreite der Messwerte herangezogen werden. Auf dieser Basis wurden eventuelle Unterschiede der Spangröße statistisch untersucht.

#### 3.2.4 Spandickenmessung

Wurde die Spandicke gemessen, dann mit einem Messschieber oder einer Messuhr mit rundem Kontaktpunkt am Ende der Spindel.

#### 3.3 Plattenherstellung

Wurden Platten hergestellt, dann dreischichtige mit einer Nenndicke von 16 mm. Je Rezeptur wurden drei gleiche Platten hergestellt (n=3). Für die Heißpressung wurde eine computergesteuerten Laborpresse genutzt. Mit Ausnahme der dünnen, flächigen Deckschichtspäne wurde die Beleimung in einem Trommelmischer (400 mm lang, Durchmesser 310 mm) mit einer pneumatisch zerstäubenden Zweistoffdüse durchgeführt. Dem Klebstoff für die Deckschichtspäne wurde 1 % Härter, 1 % Harnstoff (beides bezogen auf Feststoff

des Klebstoffes) und 0,5 % Paraffinemulsion (bezogen auf atro<sup>41</sup> Holz) zugesetzt. Dem Klebstoff für die Mittelschichtspäne wurde 3 % Härter zugesetzt. Unter Berücksichtigung der Feuchte der eingesetzten Späne wurde dem Klebstoff jeweils so viel Wasser zugesetzt, dass eine Soll-Feuchtigkeit von 11 % in den Deckschichten und 8 % in der Mittelschicht erreicht wird. War nicht der Klebstoffanteil oder das Vorgehen zur Holzreduktion variierter Parameter des Experiments, so betrug der Klebstoffanteil 11 % in den Deckschichten und 8 % in der Mittelschicht bzw. das Verhältnis von Deck- zu Mittelschicht 35/65 bei einer Plattendichte von 650 kg/m<sup>3</sup> oder 46/54 bei einer Plattendichte von 500 kg/m<sup>342</sup>. Über alle Experimente hinweg wurden gleichermaßen Platten mit einer Dichte von 650 kg/m<sup>3</sup> (Referenz-Holzeinsatz) und 500 kg/m<sup>3</sup> (reduzierter Holzeinsatz) hergestellt. Das Heißverpressen der handgestreuten Spanmatten zu Platten erfolgte bei einer Temperatur von 200 °C und einem Presszeitfaktor von 8 s/mm (128 Sekunden effektive Pressdauer). Die Schließdauer der Presse betrug 6 Sekunden. Innerhalb der ersten 20 Sekunden nach dem Schließen der Presse wurde die Spanmatte mit einem maximalen spezifischen Druck von 4 N/mm<sup>2</sup> auf bis zu 14,5 mm Dicke verdichtet. Während der folgenden 100 Sekunden wurde der maximale spezifische Druck von 4 auf 1,5 und weiter auf 1 N/mm<sup>2</sup> reduziert, während die Presse auf Plattenzieldicke (16 mm) leicht geöffnet wurde. Weiter wurde die Zieldicke für 8 Sekunden konstant gehalten, während der spezifische Druck schrittweise weiter reduziert (0,5 N/mm<sup>2</sup> pro Schritt) wurde. Nach dem Heißpressen wurden die Platten bei Umgebungsbedingungen abgekühlt und dann in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % RH bis zum Probenzuschnitt gelagert. Vor dem Prüfkörperzuschnitt wurden die Platten ringsherum um ca. 10 cm besäumt.

#### 3.4 Plattenprüfung

Wurden die Eigenschaften von Laborspanplatten bestimmt, dann in Anlehnung an folgende Normen:

- Biegefestigkeit (MOR<sup>43</sup>) und des Biege-Elastizitätsmodul (MOE<sup>44</sup>), DIN EN 310:1993-08
- Querzugfestigkeit (IB<sup>45</sup>), DIN EN 319:1993-08
- Dickenquellung nach Wasserlagerung (TS<sup>46</sup>), DIN EN 317:1993-08

Die Dickenquellung wurde nach 2 h und 24 h Wasserlagerung bestimmt (TS 2 h bzw. TS 24 h). Gleichzeitig mit der Dickenquellung wurde die Massenzunahme nach Wasserlagerung (Wasseraufnahme (WA<sup>47</sup>)) bestimmt. Hierfür wurde die Masse des aufgenommenen Wassers ins Verhältnis zum anfänglichen Prüfkörpergewicht gesetzt und als Prozentsatz angegeben.

Die Dichteprofile wurden nach dem radiometrischen Prinzip bestimmt. Hierfür wurde in zwei Fällen (Publikation I und III) ein modifizierter Itrax Wood Scanner (Cox Analytical Systems, Mölndal, Schweden), in zwei anderen Fällen (Publikation IV und V) das Messgerät Dax 6000 (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld, Deutschland) verwendet. In beiden Fällen wurden die Prüfkörper, ausgehend von der Plattenunterseite, schrittweise gescannt und die Dichte für jeden Scan-Spot ermittelt. Die gewonnenen Datensätze (Scanspotposition und Dichte) wurden auf eine einheitliche Plattendicke von 16 mm übertragen und das mittlere

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> kurz für absolut trocken

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> alleinige Reduktion der Menge an Mittelschichtspänen zur Reduktion des Holzanteils (vergl. "Methode 2", Publikation I)

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> kurz für engl. modulus of rupture

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> kurz für engl. modulus of elasticity

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> kurz für engl. internal bond strength

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> kurz für engl. thickness swelling

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> kurz für engl. water absorption

Dichteprofil für jeden Plattentyp berechnet und dargestellt. Auf Basis des übertragenen Datensatzes wurden verschiedene Kennwerte, beispielsweise die mittlere Deckschicht- und Mittelschichtdichte berechnet. Ergänzend wurde in Anlehnung an nach EN 323:1993-08 die gravimetrische Probendichte bestimmt.

Vor der Prüfung wurden die Prüfkörper bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte konditioniert, bis Massenkonstanz erreicht war.

#### 4 Auflistung und Kurzzusammenfassungen der Publikationen sowie Darlegung der eigenen Anteile des Promotionskandidaten an den für diese Dissertation herangezogenen Publikationen

4.1 Publikation I: Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards (Benthien und Ohlmeyer [2017] Eur J Wood Wood Prod 75[1]:55-62)

[Einfluss von Deck- zu Mittelschichtverhältnis und Klebstoffanteil auf die Eigenschaften dichtereduzierter Spanplatten]

Ziel der Forschungsarbeit, die dieser Publikation zugrunde liegt, war es, einen Überblick über den Einfluss der Holzreduktion auf die Eigenschaften von Spanplatten zu gewinnen. Neben dem Effekt der Dichtereduktion stand hierbei der Effekt des Ortes der Holzreduktion, d. h. ob die Holzreduktion gleichermaßen in Deck- und Mittelschicht oder allein in der Mittelschicht vorgenommen wurde, und der Effekt der Art und Weise der Holzreduktion, d. h. ob die Menge der mit Klebstoff beaufschlagten Späne oder die Menge des eingesetzten Holzes reduziert wurde, im Fokus. Wird die Holzreduktion gleichermaßen in Deck- und Mittelschicht vorgenommen, so bleibt das Deck- zu Mittelschichtverhältnis konstant; wird allein in der Mittelschicht reduziert, so verändert sich das Deck- zu Mittelschichtverhältnis. Wird die Menge der mit Klebstoff beaufschlagten Spänen reduziert, so bleibt der relative Klebstoffanteil konstant; wird die Menge des eingesetzten Holzes reduziert, führt dies zu einem Anstieg des relativen Klebstoffanteils.

Anhand von vier unterschiedlichen Plattenserien (Methode 1...4) wurde untersucht, wie eine Variation des Ortes der Holzreduktion (zu gleichen Anteilen in Deckschichten und Mittelschicht oder allein in der Mittelschicht) und der Art und Weise der Holzreduktion (nur Holz oder mit Klebstoff beaufschlagte Späne) die Platteneigenschaften (Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul, Querzugfestigkeit, Dickenquellung und Wasseraufnahme [2 h und 24 h] sowie das Rohdichteprofil) beeinflusst. Die jeweiligen Plattenserien wurden unter Variation der Plattendichte (650...400 kg/m<sup>3</sup>) hergestellt. Eine Übersicht der Deck- zu Mittelschichtverhältnisse und der Klebstoffanteile in der Mittelschicht in Abhängigkeit von Methode und Umfang der Holzreduktion (Zieldichte) ist in Tabelle 1 zu finden. Weiter wurde das Rohdichteprofil bestimmt sowie das Verdichtungsverhältnis (hier Quotient aus Matten- und Plattendicke) berechnet.

### Tabelle 3:Deck- zu Mittelschichtverhältnis und Klebstoffanteil in der Mittelschicht in Abhängigkeit<br/>von Methode und Umfang der Holzreduktion (Zieldichte).

Zieldichte	Methode 1		Meth	Methode 2		Methode 3		Methode 4	
	DS/MS	KSA-MS	DS/MS	KSA-MS	DS/MS	KSA-MS	DS/MS	KSA-MS	
650 kg/m <sup>3</sup>	35/65	8 %	35/65	8 %	35/65	8 %	35/65	8 %	
575 kg/m <sup>3</sup>	35/65	8 %	40/60	8 %	40/60	9,8 %	40/60	9,9 %	
500 kg/m <sup>3</sup>	35/65	8 %	46/54	8 %	46/54	11,6 %	46/54	13 %	
450 kg/m <sup>3</sup>	35/65	8 %	51/49	8 %	51/49	12,8 %	51/49	16,4 %	
400 kg/m <sup>3</sup>	35/65	8 %	57/43	8 %	57/43	14 %	57/43	22,3 %	

DS = Deckschicht, MS = Mittelschicht, KSA-MS = Klebstoffanteil in der Mittelschicht

Ergebnis der Untersuchung war, dass die Gestaltung der Holzreduktion vornehmlich die Querzugfestigkeit, die Dickenquellung und die Wasseraufnahme beeinflusst. Insbesondere im Dichtebereich von 400 bis 575 kg/m<sup>3</sup> wurden für Platten mit hohem Klebstoffanteil in der Mittelschicht (Methode 3 und 4) eine höhere Querzugfestigkeit als bei Platten mit einem Klebstoffanteil von 8 % in der Mittelschicht (Methode 1 und 2) festgestellt. Die Biegeeigenschaften waren nicht von der Methode der Holzreduktion beeinflusst. Als Nebenergebnis wurde der Zusammenhang von Platteneigenschaften und Plattendichte, wie von Kollmann (1966) und anderen beschrieben, bestätigt. Für alle Methoden der Holzreduktion konnte über die grafische Ergebnisdarstellung sowie die Auflistung der Differenz von Deck- und Mittelschichtdichte mit sinkender Plattendichte ein Abflachen des Rohdichteprofils gezeigt werden. Ebenfalls wurde ein sinkendes Verdichtungsverhältnis (hier Mattendicke zu Plattendicke) festgestellt.

Aus dem gleichzeitigen Abflachen des Rohdichteprofils, der sinkenden Differenz von Deck- und Mittelschichtdichte sowie der Verringerung der Biegeeigenschaften mit abnehmender Plattendichte wurde geschlussfolgert, dass für die Aufrechterhaltung der Platteneigenschaften trotz Holzreduktion die Ausbildung hochverdichteter Deckschichten sicherzustellen ist. Aus dem gleichzeitigen Sinken des Verdichtungsverhältnisses und der Verringerung der Platteneigenschaften mit abnehmender Plattendichte wurde geschlussfolgert, dass als Ergebnis der verringerten Materialverdichtung weniger bzw. kleinere Kontaktstellen zwischen den Spänen und somit weniger bzw. kleinere Klebstoffverbindungen zwischen den Spänen ausgebildet werden. Eine große Materialverdichtung mit entsprechend einer Vielzahl an großen Klebstoffverbindungen zwischen den Spänen könnte für die Deckschicht über den Einsatz von Mittelschichtspänen mit großem Verdichtungswiderstand erreicht werden.

## 4.2 Publikation II: Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing (Benthien et al. [2018] Eur J Wood Wood Prod 76[3]:937-945)

[Experimentelle Bestimmung des Verdichtungswiderstandes von Holzpartikeln unterschiedlicher Geometrie als Einflussgröße auf die Herstellung holzreduzierter Spanplatten]

Ziel der Forschungsarbeit, die dieser Publikation zugrunde liegt, war es herauszufinden, ob Späne mit geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Geometrie ihrer Verdichtung einen übergroßen Widerstand entgegensetzen. Hierfür wurde eine Methode zur experimentellen Bestimmung des Verdichtungswiderstandes entwickelt und für die Untersuchung von Spänen unterschiedlicher Geometrie angewendet. So sollte das Potenzial aussichtsreich erscheinender Späne für die Herstellung holzreduzierter Spanplatten mit Eigenschaften typischer Platten abgeschätzt werden können, ohne Laborspanplatten herstellen und testen zu müssen. Ergänzend wurde der Verdichtungswiderstand von herkömmlichen Deck- und Mittelschichtspänen sowie der Verdichtungswiderstand von Spänen bestimmt, die mit einem Messerwellenzerspaner hergestellt wurden.

Neben jeweils drei unterschiedlichen Deck- und Mittelschichtspansortimenten konventioneller Herstellung (Hersteller A...C) wurden fünf Späne innovativer Geometrie (Inno I...V) sowie fünf Fraktionen einer Messerwellenzerspanung (Hombak) untersucht. Im Fall der Hombak-Späne wurde eine Deckschichtfraktion (FL-Hom), eine Mittelschichtfraktion (CL-Hom) sowie drei Siebfraktionen (Hom 125-315, Hom 315-500 und Hom >500) untersucht. Im Fall der Späne innovativer Geometrie handelte es sich um ein Nebenprodukt einer Zerspanerlinie (Inno I), einen gezielt hergestellten Span, der würfelförmig sein sollte (Inno II) und Späne hoher Schüttdichte aufgrund ihrer Geometrie (Inno III...V), wobei Inno V in Anlehnung an Beschreibungen von Plath und Schnitzler (1974) mit einer Taumelkreissäge (Wanknutsäge)<sup>48</sup> hergestellt wurde. Auf diese Weise hergestellte Späne bezeichnen Plath und Schnitzler als S-Späne. Ein optischer Eindruck der untersuchten Späne innovativer Geometrie kann aus Abbildung 10 gewonnen werden.

Anmerkungen: (1) Eigenschaften von Platten aus Deckschichtspänen (FL bzw. DS) und Mittelschichtspänen (CL bzw. MS) verschiedener Hersteller (A...C) sowie des Spans innovativer Geometrie Inno I werden in Benthien und Ohlmeyer (2016) gegeben, wobei hier Span Inno I als MS D bezeichnet ist. Ergebnisse der Untersuchung von Platteneigenschaften mit schrittweise ansteigendem Substitutionsgrad (0, 33, 66 und 100 %) von typischen Mittelschichtspänen (MS A) durch Inno I sind in Benthien und Ohlmeyer (2018b), Teil II, Versuchsreihe 3, zu finden, wobei Inno I hier als Leuco-P-Span bezeichnet wird. (2) Nähere Informationen zur Herstellung der Späne innovativer Geometrie Inno III, Inno IV und Inno V sind in Schneider und Stehle (2016) zu finden. Ergebnisse der Untersuchung der Eigenschaften von Platten mit diesen Spänen als Mittelschichtmaterial sind in Benthien und Ohlmeyer (2018b), Teil II, Versuchsreihe 4, sowie auch gesondert für Inno V in Versuchsreihe 8 zu finden. Auf die Angabe von Kennwerten wurde zu Gunsten einer beschreibenden Ergebnissen insdarstellung konsequent verzichtet, da aufgrund der Knappheit des Materials nur eine geringe Anzahl an

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Eine Taumelkreissäge ist durch die Art des verwendeten Kreissägeblattes charakterisiert. Dieses ist mittels spezieller Aufnahmescheiben zur Drehachse in einem von 90° verschiedenen Winkel montiert. Somit vollführt das Sägeblatt bei Drehbewegung zusätzlich eine taumelnde Seitwärtsbewegung. Auf diese Weise wird eine breitere Nut geschnitten, als es die Bestückung bzw. der Schrank des Sägeblattes ermöglichen würde.

Prüfkörper zur Verfügung stand. (3) Ergebnisse der Untersuchung der Eigenschaften von Platten mit Fraktionen einer Messerwellenzerspanung, d. h. Hom FL, Hom CL, Hom 125-315, Hom 315-500 und Hom >500, sind in Benthien und Ohlmeyer (2018b), Teil II, Versuchsreihe 5, zu finden.

In der Untersuchung wurden für Deck- und Mittelschichtspäne verschiedener Hersteller und Geometrie unterschiedliche Verdichtungswiderstände gefunden. Entgegen der Ausgangshypothese wurde festgestellt, dass Späne, die aufgrund ihrer voluminösen Form eine geringe Schüttdichte aufweisen, keinen größeren Verdichtungswiderstande als Späne typischer Form aufweisen. Weiter zeigten die Versuche, dass der Verdichtungswiderstand von großen Spänen den von kleineren Spänen übersteigt und der Verdichtungswiderstand mit zunehmender Verdichtung überproportional steigt.

Vor dem Hintergrund von Ausführungen von Sosnin (1974), wonach bei der Verdichtung einer Spanmatte zunächst eine Annäherung der Partikel untereinander und erst im weiteren Verlauf eine Komprimierung des Spans an den Kontaktstellen stattfindet, wurde aus den Versuchsergebnissen geschlussfolgert, dass der Widerstand gegen die Verdichtung der Holzsubstanz den Widerstand gegen die Veränderung der Spanform übersteigt. Folglich sind Späne, die aufgrund ihrer Form eine geringe Schüttdichte aufweisen, nur dann für die Herstellung leichter Spanplatten von Vorteil, wenn über die Form eine Zunahme der Holzverdichtung erfolgt.



Abbildung 10: Späne innovativer Geometrie (Inno I...V) sowie Fraktionen einer Hombak-Messerwellenzerspaner-Herstellung (Hom).

# 4.3 Publikation III: Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation (Benthien und Ohlmeyer [2018a] Eur J Wood Wood Prod 76[3]:1087-1091)

[Verbesserung der Eigenschaften von Spanplatten niedriger Dichte aufgrund der Orientierung der Mittelschichtpartikel]

Ziel der Forschungsarbeit, die dieser Publikation zugrunde liegt, war es herauszufinden, ob sich bei vertikal zur Plattenebene ausgerichteten Mittelschichtspänen eine stärkere Verdichtung der Deckschichten und in Folge bessere Biegeeigenschaften erreichen lassen.

Zur Herstellung der Versuchsplatten wurden zunächst die Mittelschichtspäne zwischen zwei aufrechtstehende, mit Polyurethanschaum-Zuschnitten auf Distanz gehaltene Pressbleche gestreut. Nach dem Streuen der Mittelschicht wurde der Streuschacht mit einem Schaumzuschnitt verschlossen und die Streuform horizontal ausgerichtet. Zum Streuen der oberen Deckschicht wurde das obere Pressblech abgenommen, die erste Deckschicht gestreut, mit dem zuvor abgenommenen Pressblech fixiert und die Streuvorrichtung gewendet. Im Anschluss an die Streuung der zweiten Deckschicht wurde die Spanmatte heißgepresst. Es wurden Platten typischen (650 kg/m<sup>3</sup>) und reduzierten Holzeinsatzes (500 kg/m<sup>3</sup>) hergestellt. Als Referenz wurden die Platten der Publikation I herangezogen.

Bei der Streuung konnte nicht in beiden Projektionsrichtungen der Plattenebene eine vollständige vertikale Ausrichtung der Mittelschichtspäne erreicht werden. Entsprechend wurden Biegeprüfkörper entlang der zwei Hauptrichtungen zur Plattenebene zugeschnitten und in der Ergebnisauswertung separat betrachtet.

Wenngleich für eine der zwei Hauptrichtungen auch bessere Biegeeigenschaften im Vergleich zur Referenz festgestellt wurden, so wurde für die andere Hauptrichtung auch schlechter Biegeeigenschaften festgestellt. Ein einheitlicher Trend zum klaren Vorteil bzw. Nachteil einer der Hauptrichtungen war nicht zu erkennen. Wird für die Auswertung der Versuche der Mittelwert der jeweiligen Biegeeigenschaft über beide Richtungen der Plattenebene herangezogen, so ist weder für Platten mit reduziertem Holzeinsatz noch für Platten typischen Holzeinsatzes eine Verbesserung der Biegeeigenschaften zu erkennen. Die Biegeeigenschaften der Platten mit vertikaler Spanausrichtung fügen sich entsprechend ihrer Dichte in die Reihe der Biegeeigenschaften von Platten mit konventioneller Spanausrichtung ein. Gleiches gilt für die Ausprägung des Rohdichteprofils. Eine signifikante Verbesserung der Platteneigenschaften aufgrund der vertikalen Orientierung der Mittelschichtspäne wurde für die Querzugfestigkeit (Anstieg) sowie die Dickenquellung und Wasseraufnahme (Verringerung) gefunden.

Die fehlende Verbesserung der Biegeneigenschaften durch vertikale Ausrichtung der Mittelschichtspäne wurde mit dem Fehlen der Möglichkeit der Mittelschicht erklärt, in Plattenebene resultierende Zug- und Druckkräfte unterstützend aufnehmen zu können. Die Verbesserung von Querzugfestigkeit und Dickenquellung durch vertikale Ausrichtung der Mittelschichtspäne ist klar auf die größere Festigkeit und geringere Quellung in Faserrichtung des Holzes zurückzuführen. Final wurde vorgeschlagen, die vertikale Ausrichtung von Mittelschichtspänen mit dem Einsatz von Deckschichtspänen zu kombinieren, die an sich (ohne Unterstützung der Mittelschicht) die resultierenden Zug- und Druckkräfte aufnehmen können. Weiter wurde der Einsatz einer Führungsvorrichtung bei der Streuung der Mittelschicht vorgeschlagen, mit der die Anzahl der vertikal orientierten Mittelschichtspäne erhöht wird.

## 4.4 Publikation IV: Effect of increasing core layer particle thickness on light-weight particleboard properties (Benthien et al. [2019a] Eur J Wood Wood Prod 77[6]:1029-1043)

[Einfluss der Erhöhung der Dicke der Mittelschichtspäne auf die Eigenschaften von leichten Spanplatten]

Ziel der Forschungsarbeit, die dieser Publikation zugrunde liegt, war es herauszufinden, ob über die Dicke der Mittelschichtspäne eine Erhöhung des Verdichtungswiderstandes der Mittelschicht und damit eine intensivere Verdichtung der Deckschichtspäne erreicht und folglich ein Absinken der Platteneigenschaften bei Reduktion des Holzeinsatzes verhindert werden kann. Zur Erreichung des Forschungsziels wurden unter Variation des Schneidenüberstandes im Messerringzerspaner Mittelschichtspäne unterschiedlicher Dicke (dünn, normal, dick) erzeugt, hiermit Platten typischen (650 kg/m<sup>3</sup>) und reduzierten (500 kg/m<sup>3</sup>) Holzeinsatzes hergestellt, deren Eigenschaften bestimmt und mit denen von Referenzplatten verglichen. Ergänzend zur Untersuchung der Laborspanplatten wurden die Späne in händischer Vermessung sowie sieb- und bildanalytisch charakterisiert. Auf Basis der Ergebnisse der bildanalytischen Abmessungsbestimmung sowie dem massenbezogenen Klebstoffanteil wurde zusätzlich der oberflächenspezifische Klebstoffanteil berechnet.

Die Untersuchung der hergestellten Prüfspanplatten lieferte als Ergebnis, dass mit steigender Spandicke die Querzugfestigkeit von sowohl Platten typischen Holzeinsatzes als auch von Platten mit reduziertem Holzeinsatz prinzipiell steigt. Die besten mechanischen Eigenschaften (Biegung und Querzugfestigkeit) wurden bei Platten erzielt, deren Mittelschicht aus Laborspänen aufgebaut war, für deren Herstellung industrieübliche Einstellungen verwendet wurden. Eine Korrelation zwischen Spandicke und Biegeeigenschaften war nicht zu erkennen. Insgesamt war auffällig, dass die Platten mit Mittelschichtspänen aus Laborherstellung bessere Eigenschaften aufwiesen, als die Platten mit Mittelschichtspänen aus industrieller Produktion. Die Dickenquellung der holzreduzierten Platten war insbesondere nach 24 stündiger Wasserlagerung geringer als die der Platten typischen Holzeinsatzes. Ein Zusammenhang von Spandicke in der Mittelschicht und Dichteprofil war nicht zu erkennen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Dicke der Mittelschichtspäne sowie die Veränderung des oberflächenspezifische Klebstoffanteils aufgrund der Änderung der Partikelgröße nur einen geringen Einfluss auf die wesentlichen Eigenschaften holzreduzierter Spanplatten haben. Es wurde somit geschlussfolgert, dass die Erhöhung der Dicke der Mittelschichtspäne nicht geeignet ist, um die Biegeeigenschaften holzreduzierter Spanplatten auf dem Niveau von Spanplatten typischen Holzeinsatzes zu halten.

# Publikation V: Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard (Benthien und Ohlmeyer [2020] MDPI Fibers 8[7]:46)

[Auswirkungen flachgeformter Deckschichtspäne und Mittelschichtspäne beabsichtigt großer Dicke auf die Eigenschaften holzreduzierter Spanplatten]

Ziel der Forschungsarbeit, die dieser Publikation zugrunde liegt, war es herauszufinden, ob der Einsatz von dünnen, flächigen Spänen als Deckschichtmaterial die Reduktion des Holzeinsatzes bei der Plattenherstellung ermöglicht, ohne dass die Eigenschaften gegenüber denen von Platten herkömmlichen Holzeinsatzes reduziert werden. Ergänzend zu typischen Mittelschichtspänen wurden im Technikum hergestellte Späne eingesetzt, die bereits in den Versuchen von Publikation IV verwendet wurden. Weiter wurde der Einfluss einer zusätzlichen Deckschicht aus feinem Spanmaterial konventioneller Herstellung auf die Platteneigenschaften untersucht. Für die Herstellung der dünnen, flächigen Deckschichtspäne wurde ein Messerscheibenzerspaner eingesetzt. Die Abmessungen der so erzeugten Wafer betrug im Mittel 23 · 9,2 · 0,54 mm<sup>3</sup> (Länge, Breite, Dicke).

Die Verwendung von dünnen, flächigen Spänen anstelle von herkömmlichen Spänen als Deckschichtmaterial führte zu einer signifikanten Erhöhung der Biegeeigenschaften. Die Biegeeigenschaften von holzreduzierten Platten erreichten sogar das Niveau der nicht holzreduzierten Referenz. Der ergänzende Einsatz von dicken, im Labor hergestellten Spänen in der Mittelschicht wirkte sich auch positiv auf die Biegeeigenschaften aus, war im Fall der Querzugfestigkeit jedoch wesentlich stärker ausgeprägt. Nach Bereinigung um den Einfluss der Dichte (Verschiebung der Daten auf eine einheitliche Dichte) war kein Effekt der dicken Mittelschichtspäne auf die Biegeeigenschaften mehr zu erkennen. Die mechanischen Eigenschaften von holzreduzierten Platten mit dünnen, flachen Spänen und herkömmlichen Feinspänen in den Deckschichten waren gegenüber Platten allein mit dünnen, flachen Deckschichtspänen reduziert, jedoch gegenüber Platten mit konventioneller Deckschicht erhöht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich die Eigenschaften von Spanplatte über den Einsatz von Spänen spezieller Geometrie gezielt steuern, sogar trotz deutlicher Holzreduktion auf dem Niveau typischer Platten halten lässt, hierfür jedoch auch eine deutliche Veränderung der Deckschicht-Spangeometrie erfolgen muss.

### 4.6 Darlegung des eigenen Anteils des Promotionskandidaten an den für diese Dissertation herangezogenen Publikationen

Das übergeordnete Ziel der vorliegend zusammengeführten Forschungsarbeiten, nämlich die Klärung der Frage ob wesentliche Eigenschaften von Spanplatte bei Reduktion des Holzeinsatzes über Veränderungen von Spanorientierung und -geometrie, jedoch ohne den Zusatz leichter Nicht-Holz-Füllstoffe, auf dem Ausgangsniveau zu halten sind, wurde von Herrn Dipl. Holzwirt Olaf Tackmann und Herrn Dr. Martin Ohlmeyer formuliert und für deren Beantwortung ein Forschungsprojekt bei der FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen) eingeworben.

Der Autor der vorliegenden Dissertationsschrift (Promotionskandidat) ist Erstautor aller Publikationen. Promotionsbetreuer war zunächst Prof. Dr. A. Frühwald, letztendlich dann Prof. Dr. Andreas Krause. Der Promotionskandidat entwickelte in Zusammenarbeit mit Kollegen (vornehmlich Dr. Martin Ohlmeyer) und Mitarbeitern (Dr. Martin Dressler, Prof. Dr. Joachim Hasch, Dipl. Holzwirt Maik Hischberg, Dr. Helmut Roll, Dipl.-Ing. Matthias Schneider, Dr.-Ing. Dan Talpeanu) bei den Projektpartnern (Universität Stuttgart, Institut für Werkzeugmaschinen (IfW), Stuttgart, Leuco Ledermann GmbH & Co. KG, Horb am Neckar, Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Zweibrücken, Swiss Krono Group, Luzern, CH) die konkreten Inhalte der Forschungsarbeiten (Publikation I...V) sowie den für die Untersuchungsdurchführung erforderlichen Versuchsaufbau.

Die Ausführung der Experimente sowie die Auswertung der erhaltenen Daten wurde federführend vom Promotionskandidaten vorgenommen. Für die Unterstützung bei der Durchführung praktischer Arbeiten durch technische Assistenten und studentische Hilfskräfte wird sich an dieser Stelle erneut herzlich bedankt.

Das Verfassen der Publikationsmanuskripte und die Abwicklung der anschließenden Review-Prozesse führte der Promotionskandidat selbständig durch. Die Reihenfolge der Nennung der Autoren spiegelt klar deren Beteiligung am Artikel wider. Korrekturvorschläge von Seiten des Co-Autors führten zu keiner signifikanten Veränderung des ersten Manuskriptentwurfe.

Die Anteile des Promotionskandidaten an den Publikationen I...V lassen sich wie folgt quantifizieren:

- Konzeption: 80 %
- Durchführung: 100 %
- Auswertung:100 %
- Schreiben: 80 %

Hiermit bestätige ich, dass die Angaben zutreffen.

(Prof. Dr. A. Krause)

#### **5** Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

#### 5.1 Bedeutung von Spanverdichtung bzw. Verdichtungsverhältnis für die Platteneigenschaften bei reduziertem Holzeinsatz

In Publikation I wurde für jeden Plattentyp das Verdichtungsverhältnis als Quotient von Spanmattendicke zu Plattendicke bestimmt. Basis dieses Vorgehens war insbesondere eine Arbeit von Schirp (2009), in der das Verdichtungsverhältnis entsprechend verstanden und dessen Bedeutung für die Herstellung von leichten Spanplatten betont wurde. Für das Verfolgen dieses Ansatzes sprach weiter, dass auch in anderen Arbeiten das Verdichtungsverhältnis so formuliert (Vos 2009) oder vor der eigentlichen Definition missverständlich beschrieben (Dunky und Niemz 2002)<sup>49</sup> wurde. Ob ein so definiertes, großes Verdichtungsverhältnis für die Herstellung leichter Spanplatte tatsächlich relevant ist, wurde in Publikation II über die Bestimmung des Verdichtungswiderstandes u. a. von Spänen voluminöser Form untersucht. Bei diesen Versuchen (Publ. II) sowie der Bestimmung der Eigenschaften von Platten mit Spänen geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form (Kapitel 4.2, Anmerkung, Punkt 2) wurden jedoch keine Anhaltspunkte dafür gefunden, dass über ein großes Verhältnis von Mattendicke zur späteren Plattendicke ein positiver Effekt auf die Eigenschaften holzreduzierter Platten zu erwarten ist.

Ein deutlicher Zusammenhang (positiv) zwischen Verdichtungsverhältnis und mechanischen Platteneigenschaften liegt laut anderen Quellen jedoch vor, wenn das Verdichtungsverhältnis als Quotient von Plattendichte zu Holzdichte<sup>50</sup> berechnet wird. Das so definierte Verdichtungsverhältnis wird von Dunky und Niemz (2002)<sup>51</sup> als die entscheidende Maßzahl (üblicherweise im Bereich von 1,3 bis 1,5) für die Erzielung eines ausreichenden Kontaktes der Späne untereinander während des Pressvorgangs beschrieben.

Irle und Barbu (2010) geben an, dass die Späne auf mindestens 5 % über ihrer natürlichen Dichte komprimiert werden müssen, um eine Platte mit ausreichender Festigkeit herzustellen. Weiter wird ausgeführt, dass das Rohmaterial in der Praxis gewöhnlich auf annähernd 50 % seiner natürlichen Dichte verdichtet wird und dieser Verdichtungsgrad erforderlich ist, um einen "guten" Span-zu-Span-Kontakt zu erreichen. Als natürliche Dichte der Späne ist hier die Dichte des Holzes zu verstehen, aus dem die Späne bestehen. Unter der Dichte des verdichteten Materials ist hier die Plattendichte zu verstehen.

Ergebnisse einer beispielhaften Berechnung der Holzdichte für Plattendichten von 500 und 650 kg/m<sup>3</sup> unter Annahme der Angaben von Irle und Barbu (2010) und Dunky und Niemz (2002) sind in Tabelle 4 zu finden.

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup> Dunky und Niemz (2002), Seite 815: "Das zur Herstellung von Spanplatten gleicher Rohdichte erforderliche Spanvolumen ist bei leichten Holzarten größer, damit wird ein größeres Verdichtungsverhältnis erreicht. Dieses höhere Verdichtungsverhältnis führt [...] zu verbesserten mechanischen Eigenschaften [...]."

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> Dichte des Holzes, aus dem die zur Plattenherstellung eingesetzten Späne bestehen

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Dunky und Niemz (2002), Seite 815: "Als Verdichtungsverhältnis gilt der Quotient zwischen der Plattendichte und der (durchschnittlichen) Dichte der Späne(mischung)."

Tabelle 4:Ergebnisse der beispielhaften Berechnung der Holzdichte für Plattendichten von 500 und<br/>650 kg/m³ unter Annahme der Angaben von Irle und Barbu (2010) und Dunky und Niemz<br/>(2002) zum Grad der Verdichtung bzw. dem Verdichtungsverhältnis.

		Holzdichte	
bei Grad der Verdichtung <sup>1</sup> /	5 %	(30 %)	50 %
bei Verdichtungsverhältnis <sup>2</sup>	(1,05)	1,3	1,5
für Plattendichte 650 kg/m <sup>3</sup>	619 kg/m <sup>3</sup>	500 kg/m <sup>3</sup>	433 kg/m <sup>3</sup>
(für Plattendichte 600 kg/m <sup>3</sup> )	-	-	(400 kg/m <sup>3</sup> )
für Plattendichte 500 kg/m <sup>3</sup>	476 kg/m <sup>3</sup>	385 kg/m³	333 kg/m <sup>3</sup>

<sup>1</sup> nach Irle und Barbu (2010), <sup>2</sup> nach Dunky und Niemz (2002)

Der Zusammenhang von Verdichtungsverhältnis und Platteneigenschaft (Biegefestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul und Querzugfestigkeit wurde von Hse (1975) an einschichtigen, Phenolharz gebundenen Platten (~500 mm · ~500 mm) mit einer Dicke von 12,7 mm (1/2 Inch) untersucht. Der Klebstoffanteil betrug hier 4 %. Die im Labor gefertigte Späne hatten Abmessungen von 76,2 mm (3 Inch) in der Länge, 9,5 mm (3/8 Inch) in der Breite und 0,38 mm (0,015 Inch) in der Dicke. Die Dichte der Platten variierte zwischen 625 und 810 kg/m<sup>3</sup>. Die Dichte der eingesetzten, neun verschiedenen Holzarten variierte zwischen 481 und 762 kg/m<sup>3</sup>. Das anhand von Plattendichte und Holzdichte berechnete Verdichtungsverhältnis bewegt sich zwischen minimal 0,92 und maximal 1,53. Für den Zusammenhang zwischen Verdichtungsverhältnis und Biegefestigkeit wurde ein Korrelationskoeffizient von r = 0,93 gefunden, für das Biege-Elastizitätsmodul r = 0,83 und für die Querzugfestigkeit r = 0,85. Das bedeutet, dass das Verdichtungsverhältnis nach der hier vorgenommenen Definition einen großen Effekt auf die Platteneigenschaften hat. Eine graphische Darstellung der Zusammenhänge wird in Abbildung 11 gegeben, wobei für dessen Anfertigung die von Hse angegebenen Geradengleichungen umgestellt (Y = b + aX  $\Leftrightarrow$  f(x) = ax + b), von psi in N/mm<sup>2</sup> umgerechnet und für x das minimale und die maximale Verdichtungsverhältnis (siehe oben) eingesetzt wurden:

- MOR: Y = 2759,6 + 7781,5X (in psi) ⇔ f(x) = 53,7x + 19,0 (in N/mm<sup>2</sup>)
- MOE: Y = 123573,65 + 545428,6X (in psi) ⇔ f(x) = 3760x + 852 (in N/mm<sup>2</sup>)
- IB: Y = -358 + 423X (in psi) ⇔ f(x) = 2,9x 2,5 (in N/mm<sup>2</sup>)



#### Abbildung 11: Darstellung der von Hse (1975) gefundenen Zusammenhänge zwischen jeweils dem Verdichtungsverhältnis und der Biegefestigkeit (MOR), dem Biege-Elastizitätsmodul (MOE) und der Querzugfestigkeit (IB).

Ähnliche Versuche wie Hse (1975) führten bereits Stegmann et al. (1965) durch und zeigten den (positiven) Zusammenhang zwischen der Rohdichte der eingesetzten Holzart (Pappel, Kiefer, Birke, Buche) und den Platteneigenschaften (Biege- und Querzugfestigkeit). Die zugehörigen Verdichtungsverhältnisse werden in Tabelle 5 berechnet. Interessant (wohl aber anzuzweifeln) bei der Arbeit von Stegmann et al. ist der Erklärungsansatz, dass für den Anstieg der Platteneigenschaften bei Verwendung von Holzarten niedrigerer Dichte zum einen der hohen Verdichtungsgrad (angeführt wird hier anstelle der Rohdichte des Holzes die Schüttdichte der Späne), zum anderen die "günstigen Verhältnisse beim Verleimen" ursächlich sind. Als günstig wird eine große Spanoberflächensumme genannt, auf die sich der Klebstoff verteilen muss. Darauf aufbauend wird aus der Kombination von steigender Spanoberfläche und Platteneigenschaften ein Anstieg des Nutzungsgrades des Bindemittels abgeleitet.

Listent	Rohdichte* –	Verdichtungsverhältnis bei Plattendichte				
Holzart		0,3 g/cm <sup>3</sup>	0,5 g/cm <sup>3</sup>	0,7 g/cm <sup>3</sup>		
Pappel	0,44 g/cm <sup>3</sup>	0,7	1,1	1,6		
Fichte	0,51 g/cm <sup>3</sup>	0,6	1,0	1,4		
Birke	0,64 g/cm <sup>3</sup>	0,5	0,8	1,1		
Buche	0,72 g/cm <sup>3</sup>	0,4	0,7	1,0		

#### Tabelle 5: Zu Stegmann et al. (1965) berechnete Verdichtungsverhältnisse.

\* Aus Grafik Abb. 2 in Stegmann et al. (1965) abgelesen

Untersuchungen von Nelis et al. (2018) und Nelis und Mai (2019) an Platten aus Industriespänen und Spänen gleicher Größe aus dem Holz des Blauglockenbaums<sup>52</sup> (*Paulownia tomentosa*), für das eine Dichte von 350 kg/m<sup>3</sup> angegeben wird, zeigten sowohl für einschichtige Platten (Nelis et al. 2018) als auch für dreischichtige Platten (Nelis und Mai 2019), dass der Einsatz von Spänen aus einer Holzart geringer Dichte zu besseren mechanischen Platteneigenschaften führt bzw. im Umkehrschluss deren Verwendung eine Reduktion des Holzeinsatzes erlaubt, ohne dass hierbei Einbußen der mechanischen Platteneigenschaften hingenommen werden müssen. Nelis und Mai (2019) zeigten darüber hinaus, dass der Einsatz von Spänen aus Kiri in der Mittelschicht sowohl zu einem ausgeprägteren Rohdichteprofil, als auch zu einem Anstieg der Biegeeigenschaften führt, während die Ausprägung des Rohdichteprofils abnimmt. Diese Aspekte werden in Kapitel 5.8 wieder aufgegriffen und diskutiert.

Die Befassung mit dem Verdichtungsverhältnis im Kontext der Herstellung holzreduzierter Spanplatten hat die Erkenntnis gebracht, dass diesem Kennwert zwei unterschiedliche Berechnungswege zugrunde liegen. Beim Verfolgen des Ansatzes in eigenen Versuchen, nach dem sich Späne geringer Schüttdichte (aufgrund ihrer voluminösen Form) besonders für die Herstellung leichter Spanplatten eignen, wurde das als der Quotient aus Mattendicke und Plattendicke definierte Verdichtungsverhältnis als wenig hilfreicher Kennwert erkannt. Grundlage dieser Feststellung waren die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Verdichtungswiderstandes und der Eigenschaften von Platten mit Spänen geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form. Beim Studium der Literatur wurde deutlich, dass vielmehr das als Quotient aus Plattendichte und Holzdichte definierte Verdichtungsverhältnis ein geeigneter Kennwert ist, der im Kontext der Herstellung holzreduzierter Spanplatten Bedeutung hat. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass, wenn zur Herstellung holzreduzierter Spanplatten erfolgreich Späne geringer Schüttdichte eingesetzt werden, dies entweder ein Effekt der geringen Holzdichte ist oder andere Details (z. B. flächige Spanform, größere Kontaktflächen zwischen den Spänen) als die Schüttdichte für die Zielerreichung ursächlich sind.

#### Ergänzende Exkurse:

(1) Eine, dem von Schirp (2009) sowie Vos (2009) definierten Verdichtungsverhältnis vergleichbare Kennzahl wurde von Suzuki und Kato (1989) in Form des Packungsverhältnisses (engl. packing rate) als das Verhältnis des Volumens von Fasern und des ausgehärteten Klebstoffes zum Volumen der Faserplatte definiert. Bei der Einführung dieser Kennzahl ging es bei näherer Betrachtung jedoch weniger darum, den Einfluss des Volumens des Fasermaterials auf die Platteneigenschaften zu erfassen. Vielmehr wurde hiermit der Umstand beleuchtet, dass mit steigender Materialmenge auch das Materialvolumen steigt.

(2) Im Kontext der Herstellung von Spänen geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form definierten Schneider et al. (2018) den Kennwert Auflockerungsfaktor (engl. loosening factor) als das Verhältnis der Dichte des zur Spanherstellung eingesetzten Holzes (hier 480 kg/m<sup>3</sup>) zur Schüttdichte der erzeugten Spanmaterialien (213 kg/m<sup>3</sup>, 176 kg/m<sup>3</sup>, 158 kg/m<sup>3</sup>, 153 kg/m<sup>3</sup>) und berechneten entsprechend Werte von 2,25, 2,72, 3,03 und 3,12.

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> im Handel als Kiri oder Paulownia bezeichnet

(3) Keylwerth (1958) nennt im Kontext der "Ermittlung des resultierenden Bindemittelgehaltes aus den Werkstoffeigenschaften" als eine der vier hierfür erforderlichen Größen das Verdichtungsverhältnis, dass als Quotient aus Darrdichte der Deckschicht und der Darrdichte der Mittelschicht (einer Spanplatte) definiert ist.

#### 5.2 Verdichtungswiderstand - voluminöse Spanform, geringe Schüttdichte

In Publikation II wurde der Verdichtungswiderstand von typischen Spänen zur Spanplattenherstellung sowie von Spänen hiervon abweichender Geometrie bestimmt. Mit der Bestimmung des Verdichtungswiderstandes sollte abgeschätzt werden, ob sich Mittelschichtspäne mit geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form in besonderem Maße für die Herstellung von holzreduzierten Spanplatten eignen. Idee zur Erklärung der besonderen Eignung war, dass solche Späne einen größeren Verdichtungswiderstand als typische Mittelschichtspäne aufweisen, es darüber im Zuge der Plattenherstellung zu einem stärker ausgeprägtem Rohdichteprofil kommt (Ausführungen hierzu in Kapitel 5.3) und so - aufgrund des Beplankungseffektes - trotz Holzreduktion die Biegeeigenschaften auf dem Niveau der Ausgangsplatten zu halten sind (Ausführungen hierzu in Kapitel 5.4).

Die Bestimmung der Verdichtungswiderstände von Deck- und Mittelschichtspänen verschiedener Hersteller sowie von Spänen unterschiedlicher Geometrie (Publikation II) zeigte zwar, dass unterschiedliche Kompressibilitäten vorliegen, Späne mit einer geringen Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form jedoch keinen größeren Verdichtungswiderstand als Späne typischer Form aufweisen. Weiter wurde in Publikation II gezeigt, dass der Verdichtungswiderstand von großen Spänen den von kleineren Spänen übersteigt und der Verdichtungswiderstand mit zunehmender Verdichtung überproportional steigt. Sowohl der festgestellte größere Verdichtungswiderstand von großen Spänen<sup>53</sup>, als auch der steigende Verdichtungswiderstand mit steigender Dichte der Spanmatte im Zuge der Verdichtung deckt sich mit Ergebnissen einer Studie von Haas und Frühwald (2000). Das Ergebnis, dass Späne mit einer geringen Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form keinen größeren Verdichtungswiderstand als Späne typischer Form aufweisen, passt zu dem Ergebnis der Bestimmung der Eigenschaften von Platten aus entsprechenden Spänen (Kapitel 4.2, Anmerkung, Punkt 2), nämlich, dass der Einsatz von Spänen mit einer geringen Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form keinen positiven Effekt auf die Eigenschaften holzreduzierter Platten hat, und erscheint somit plausibel.

Vor dem Hintergrund der Überlegungen zur Entstehung und Vergrößerung der Kontaktflächen zwischen den Spänen sowie der Verdichtung der Holzsubstanz an den Kontaktstellen

- 1. punktförmig nach der Streuung, Anstieg von Anzahl und Größe im Zuge der Verdichtung
- 2. individuelles Zusammenspiel von wirkender Kraft, Kontaktfläche und Verdichtungswiderstand (wobei sich Kraft, Kontaktfläche und Verdichtungswiderstand im Zuge er Verdichtung verändern)

ist eine direkte Übertragung der Versuchsergebnisse aus Publikation II in eine rechnerische Modellierung mit gängigen Holzeigenschaften (z. B. Druckfestigkeit quer zur Faser) problematisch. Der Verdichtungswiderstand (der Spanmatte) wurde anhand von Prüfkraft und Prüfstempelfläche berechnet. Druckfestigkeit und -elastizitätsmodul werden rechtwinklig zur Faserrichtung anhand von Maximalkraft bzw. Last-Verformungsverhältnis und tatsächlich belasteter Grundfläche der Holzsubstanz (z. B. DIN EN 408:2012-10<sup>54</sup>) berechnet. Zu

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Bei Hass und Frühwald (2000) werden Stands als "große Späne" herangezogen.

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> ggf. auch DIN 52185:1976-09 oder DIN 52192:1979-05, mit Blick auf DIN EN 1995-1-1:2010-12 besser DIN EN 408:2012-10

beachten wäre ebenso, dass es sich bei der Verdichtung der Holzsubstanz an den Kontaktflächen der Späne, insbesondere bei elliptischer Spanform, um eine Kombination aus elastischer und plastischer Verformung unbekannter Ausprägung handelt und die Größe der (Holz-) Fläche, auf die die Kraft wirkt, unbekannt ist.

In der Diskussion der Ergebnisse in Publikation II wurde Grigoriou (1981) mit der Aussage zitiert, dass Späne aus Weymouthskiefer (Strobe) eine geringere Kompressibilität (Verformbarkeit bei gegebenem Pressdruck) aufweisen, als es aufgrund der Schüttdichte zu erwarten gewesen wäre, und der Einfluss des Schüttgewichts auf die Kompressibilität hier von anderen Einflussfaktoren überlagert wird. Die intensivere Befassung mit den Daten (Tabelle 6) von Grigorio erlaubt es jedoch, einen weitreichenderen Beitrag zur Beantwortung der Frage, ob sich Mittelschichtspäne mit geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form in besonderem Maße für die Herstellung von holzreduzierten Spanplatten eignen, zu leisten.

Holzart	Botanischer Name	Holzdichte (g/cm³)	Schüttdichte (g/cm³)	Kompressibilität (mm²/N)	
Strobe	Pinus strobus	0,34	0,094	0,461	
Pappel	Populus robusta	0,42	0,093	0,482	
Tanne	Abies alba	0,43	0,106	0,477	
Kiefer	Pinus nigra	0,52	0,128	0,451	
Eiche	Quercus robur	0,69	0,180	0,362	
Buche	Fagus silvatica	0,70	0,150	0,430	
Hainbuche	Carpinus betulus	0,78	0,155	0,427	

**Tabelle 6:**Betrachtete Daten aus Grigoriou (1981).

Der von Grigoriou erarbeitete und allein in Tabellen dargestellte Zusammenhang von Holzdichte und Schüttgewicht bei Spänen gleicher Zerspanung ist in Abbildung 12a grafisch aufgearbeitet.



#### Abbildung 12: Auswertung der in Tabelle 6 aufgelisteten Daten von Grigoriou (1981), (a) Holzdichte gegen Schüttdichte, (b) Schüttdichte gegen Kompressibilität.

Wie auch von Grigoriou beschrieben, wird hieraus deutlich, dass das Schüttgewicht von Spänen aus Pappel und Hainbuche niedriger, und das von Spänen aus Eiche höher ist, als es aufgrund der Dichte des Holzes zu

erwarten wäre. Als Grund hierfür werden - neben anderen - die Spandimensionen und die Spanform aufgeführt und als Beispiel der faserige und wollige Charakter der Pappelspäne genannt. Weiter wurde von Grigoriou festgestellt, dass die Kompressibilität wesentlich von der Schüttdichte abhängt. Grafisch aufbereitet ist der bei Grigoriou allein in Tabellenform dargestellte Zusammenhang von Schüttdichte und Kompressibilität in Abbildung 12b. Wie Grigoriou es allein für Strobe beschreibt, wird hieraus auch für Späne aus Eiche eine geringere Kompressibilität augenscheinlich, als es aufgrund der Schüttdichte zu erwarten wäre. Als Grund hierfür gibt Grigoriou auf die Strobe bezogen an, dass neben der Schüttdichte andere Einflussfaktoren wie beispielsweise die Fraktionszusammensetzung, die Druck- und Biegefestigkeit der einzelnen Späne, die Spanabmessungen, die Richtung der Späne in Bezug zur Einstreuebene Einfluss auf die Kompressibilität haben. Dass es tatsächlich nicht allein die Schüttdichte ist, die neben der Holzdichte Einfluss auf die Kompressibilität hat, wird aus dem Vergleich der Grafiken in Abbildung 12 deutlich. Wäre allein die Schüttdichte die Einflussgröße, müssten die in Abbildung 12a auffälligen Späne (Pappel, Hainbuche, Eiche) ebenfalls in Abbildung 12b die auffälligen Späne sein; tatsächlich sind es hier aber Späne aus Eiche und Strobe. Darauf, dass neben der Holzdichte und der Schüttdichte auch noch andere Einflussgrößen die Kompressibilität bestimmen, weist auch das geringere Bestimmtheitsmaß ( $R^2 = 0.53$ ) beim Betrachten des Zusammenhangs von Holzdichte und Kompressibilität aus Tabelle 6 hin.

Die in Publikation IV und V beschriebenen Versuche folgen z. T. zwar grundsätzlich dem Ergebnis, dass große Späne gegenüber kleinen Spänen einen größeren Verdichtungswiderstand aufweisen, die hiermit hergestellten Platten folglich ein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil sowie bessere Biegeeigenschaften zeigen müssten. Jedoch wurden nur Platten hergestellt und deren Eigenschaften geprüft, nicht aber explizit der Verdichtungswiderstand bestimmt. Aus diesem Grund werden Publikation IV und V in Kapitel 5.6 diskutiert.

### 5.3 Zusammenhang zwischen Verdichtungswiderstand und Ausprägung des Rohdichteprofils

Bei keiner der hier zu diskutierenden Untersuchungen (Publikation I...V) wurde direkt der Einfluss des Verdichtungswiderstandes von Deck- oder Mittelschichtspänen auf die Ausprägung des Rohdichteprofils untersucht. In Publikation II wurde für verschiedene Späne fortlaufend der Druck aufgezeichnet, der ausgehend von der Schüttdichte für die kalte Verdichtung bis hin zu einer Mattendichte von 1100 kg/m<sup>3</sup> nötig ist. Verglichen wurde für verschiedene Späne der Druck, der zum Erreichen einer bestimmten Mattendichte erforderlich ist. In Publikation III wurden die Mittelschichtspäne durch die Art der Streuung zwar so ausgerichtet, dass ein erhöhter Verdichtungswiderstand zu erwarten ist (schräg und aufrechte Orientierung zur Plattenebene), sowie das Rohdichteprofil der Platten bestimmt, jedoch nicht der Verdichtungswiderstand selbst gemessen. Vergleichbar wurde in Publikation IV und V vorgegangen. Es wurden zwar dickere Späne mit folglich erwartetem, höherem Verdichtungswiderstand eingesetzt sowie das Rohdichteprofil der Platte bestimmt, jedoch erfolgte keine Bestimmung des Verdichtungswiderstandes. Somit lässt sich anhand der unternommenen Versuche nicht direkt der Zusammenhang zwischen Verdichtungswiderstand (von Deck- und Mittelschichtspänen) und Ausprägung des Rohdichteprofils erarbeiten, wenngleich dies eine der grundliegenden Fragestellungen der vorliegenden Arbeit war.

Ein erster Ansatz zur Untersuchung des Zusammenhangs von Verdichtungswiderstand und Ausprägung des Dichteprofils dreischichtiger Platten aus Deck- und Mittelschichtspänen könnte es sein, die Ergebnisse aus Publikation II mittels eines Vergleiches der Mattendichten eines später eingesetzten Deck- und Mittelschichtspans bei gleichem Verdichtungsdruck auszuwerten und das so erhaltene Ergebnis weiter mit den Rohdichteprofilen von Platten in Verbindung zu bringen, die aus genau diesen Spänen hergestellt wurden. Konkret wäre dies für die Späne FL A, FL B, FL C, CL A, CL B, CL C und INNO I aus Publikation II (Mattendichten bei gleichem Verdichtungsdruck) möglich, da aus diesen Spänen in Benthien und Ohlmeyer (2016) Platten hergestellt und Rohdichteprofile bestimmt wurden. Die voneinander abweichenden Spanbezeichnungen lassen sich wie folgt zusammenbringen:

- FL A = DS A
- FL B = DS B
- FL C = DS C
- CL A = MS A
- CL B = MS B
- CL C = MS C
- INNO I = MS D

Begrenzt wäre die Aussagekraft einer solchen Betrachtung insoweit, als dass die Verdichtungsversuche bei Raumtemperatur an Spänen einheitlicher Feuchte durchgeführt wurden, die Plattenherstellung und damit die Ausbildung des Rohdichteprofils jedoch beim Verdichten von Deckschichtspänen höherer Feuchte und Mittelschichtspänen niedrigerer Feuchte in der Heißpresse erfolgte.

Dass der Verdichtungswiderstand der Deck- und Mittelschichtspäne die Ausprägung des Rohdichteprofils (innerer Aufbau) bestimmt, wird von Keylwerth (1958) in einem Aufsatz zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte in den Ausführungen zur im Folgenden als Gleichung 2 bezeichneten "Verfahrensgleichung" beschrieben.

$$\rho_{\rm res} = (G_{\rm m} + G_{\rm d}) / (F \cdot d) = \rho_{\rm m} (1 - \lambda) + \rho_{\rm d} \lambda$$

mit

 $\rho_{\rm res}$  resultierende Plattendichte  $G_{\rm m}$  Masse der Mittelschichtspäne  $G_{\rm d}$  Masse der Deckschichtspäne F Press- bzw. Plattenfläche d Plattendicke  $\rho_{\rm m}$  Dichte der Mittelschicht  $\rho_{\rm d}$  Dichte der Deckschicht  $\lambda$  Beplankungsverhältnis wobei

λ	=	2s/d
		23) U

mit s Deckschichtdicke d Plattendicke

Zum rechten Teil der Gleichung heißt es, dass die Dichte von Deck- bzw. Mittelschicht Funktionen des Pressdrucks sind ( $\rho = f(\rho)$ ), die Funktion des Pressdrucks von den Spaneigenschaften abhängt und sich, entsprechend dieser Anhängigkeit, das Verhältnis von Deck- zu Mittelschichtdicke beim Pressen ausbildet. Die Funktion des Pressdrucks, wie der Pressdruck also den inneren Aufbau der Platte gestaltet, hängt folglich davon ab, welchen Widerstand die Späne ihrer Verdichtung entgegensetzen. Dies verdeutlicht die schlussfolgernd hervorgehobene Erklärung zu Gleichung 2, nach der laut Keylwerth die Funktion des Pressdrucks durch

Gleichung 3

Gleichung 2

52

Befeuchtung der Deckschichtspäne verändert werden kann (d. h. Verringerung des Verdichtungswiderstands) und sich hieraus eine Veränderung der Deckschichtdichte sowie des Beplankungsverhältnisses ergibt. Plath (1971) weist in einem Beitrag zur Mechanik der Holzspanplatten schlussfolgernd darauf hin, dass aus einem hohen Verdichtungswiderstand der Mittelschichtspäne eine große Rohdichtedifferenz zwischen Deckund Mittelschicht folgt. Vergleichbare Anmerkungen sind auch bei Plath und Schnitzler (1974) und Boehme (1992) zu finden.

#### 5.4 Beziehung zwischen Rohdichteprofil und Biegeeigenschaft

Anders als homogene Werkstoffe weisen Spanplatten über ihren Querschnitt in der Regel ein (symmetrisches) Dichteprofil auf, das durch stärker verdichtete Deckschichten und eine weniger stark verdichtete Mittelschicht gekennzeichnet ist. Ähnlich der Dichte liegt über den Querschnitt für gewöhnlich weiter eine unterschiedliche Verteilung der Spangröße sowie des Klebstoffes, mit kleineren Spänen und mehr Klebstoff in den Deckschichten und größeren Spänen und weniger Klebstoff in der Mittelschicht, vor. Aber auch dann, wenn nur Späne einheitlichen Beleimungsgrades sowie einheitlicher Größe zur Plattenherstellung eingesetzt werden, bildet sich bei entsprechend gewählten Pressparametern ein Rohdichteprofil aus. Da, wie die Spangröße und der Klebstoffanteil, auch die Dichte die Eigenschaften des Spanverbundes bestimmt, kann Spanplatte im einfachsten Modell als dreischichtiger Verbundwerkstoff verstanden werden.

Bei ansonsten unveränderten Parametern bewirkt der dreischichtige Querschnittsaufbau gegenüber einer homogen aufgebauten Platte eine Erhöhung der Biegeeigenschaften. Schließlich liegen in den Schichten großer Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften jeweils das Maximum der resultierenden Druck- bzw. Zugspannung. Eine Schärfung des Rohdichteprofils hat somit einen Anstieg der Biegeeigenschaften zur Folge (Beplankungseffekt). Gleichwohl müsste es durch die Schärfung des Rohdichteprofils aber auch möglich sein, Platten mit unveränderten Biegeeigenschaften aber reduziertem Holzeinsatz (geringere Dichte) herstellen zu können. Das zumindest war eine der Grundideen, die in den Publikationen III...V über die Erhöhung des Verdichtungswiderstandes des Mittelschichtmaterials zu erreichen versucht wurde.

Dass die Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften der Deckschichten (bei unverändertem Spanmaterial wäre das also allein deren Dichte) zu einem bedeutenden Teil (2/3 des Biegemoments wird von der Deckschicht aufgenommen) die Biegeeigenschaften bestimmen, wird aus dem Aufsatz von Keylwerth (1958) zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte deutlich. Hier wird im Anschluss an eine umfangreiche Herleitung für die zwei betrachteten Beispielplatten (A1 und A3) die Biegebeanspruchbarkeit (bis zur Proportionalitätsgrenze) als das Produkt der Randfaserspannung (Proportionalitätsgrenze der Zugfestigkeit der Deckschicht) und "f" (Gleichung 4) exemplarisch berechnet.

$$\sigma_{\rm B} = f \cdot \sigma_{\rm Z}$$

mit

 $\sigma_{B}$  Proportionalitätsgrenze der Biegebeanspruchbarkeit  $\sigma_{Z}$  Proportionalitätsgrenze Zugfestigkeit der Deckschicht

"f" - laut May (1977) ein "Abminderungsfaktor des E-Moduls der Außenzone" - wird hierbei unter Einsatz der Mittelwerte von Zug- und Druckmodul von jeweils Deck- und Mittelschicht sowie dem Beplankungsverhältnis  $\lambda$  (Gleichung 5) berechnet.

$$f = 1 - (1 - E_{\rm M}/E_{\rm D}) \cdot (1 - \lambda)^3$$

mit

Gleichung 4

Gleichung 5

E<sub>M</sub> Elastizitätsmodul der Mittelschicht

E<sub>D</sub> Elastizitätsmodul der Deckschicht

 $\lambda$  Beplankungsverhältnis (siehe Gleichung 3)

Anknüpfend an die Ausführungen zur Mechanik mehrschichtiger Spanplatten von Keylwerth (1958) weißt May (1977) auf den positiv-korrelativen Zusammenhang von Eigenschaft und Dichte sowie die besondere Bedeutung der stärker verdichteten Deckschichten (Beplankung), aufgrund deren Entfernung von der neutralen Faser im Kontext des Trägheitsmomentes (quadratischer Einfluss), auf die Biegeeigenschaften der Platte hin. Neben Keylwerth (1958) sind bei Plath (1971), Hänsel und Kühne (1988) und Blaß und Fellmoser (2004) Modelle zur Vorausberechnung der Biegeeigenschaften zu finden, wobei das Modell von Blaß und Fellmoser ursprünglich für mehrschichtige Massivholzplatten vorgesehen ist.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass bei Spanplatte in der Regel nicht allein für die Dichte ein Unterschied zwischen Deck- und Mittelschicht besteht, sondern gleichzeitig auch die Spangröße unterschiedlich ist. Während sich der Dichteunterschied zwischen Deck- und Mittelschicht positiv auf die Biegeeigenschaften der Platte auswirkt, dürfte der Einsatz von feinen Spänen als Deckschichtmaterial den genau gegenteiligen Effekt haben. Im Hinblick auf die mechanischen Platteneigenschaften müssten als Deckschichtmaterial weniger feine, sondern vielmehr Späne eingesetzt werden, die aufgrund ihrer Geometrie (Kapitel 5.7) einen direkten Beitrag zu den Werkstoffeigenschaften liefern. Die Verteilung der Spangröße über den Plattenquerschnitt (feine Späne als Deckschichtmaterial) erfolgt in erster Linie im Hinblick auf die spätere Oberflächenbeschichtung und nicht, wie es aus dem Effekt der Dichteverteilung irrtümlich geschlossen werden könnte, im Hinblick auf die Platteneigenschaften.

#### 5.5 Orientierung von Mittelschichtspänen

Die in Publikation III beschriebenen Versuche haben gezeigt, dass über die Ausrichtung der Mittelschichtspäne zwar eine signifikante Verbesserung von Querzugfestigkeit (Anstieg) und Dickenquellung (Verringerung), nicht aber der Biegeeigenschaften (bzw. deren Aufrechterhaltung bei gleichzeitiger Reduktion des Holzeinsatzes) erreicht werden kann. Für die Steigerung der Querzugfestigkeit aufgrund der veränderten Streuung gibt May (1974) einen Wert von "ca. 30 %" an. Eigene Versuche zeigten eine Steigerung der Querzugfestigkeit von 109 %<sup>55</sup> (bei einer Plattendichte von 600 kg/m<sup>3</sup>) und 126 %<sup>56</sup> (bei einer Plattendichte von 455 kg/m<sup>3</sup>). Ob, wie in der Konzeption der Versuche angenommen, vertikal ausgerichtete Mittelschichtspäne tatsächlich einen erhöhten Verdichtungswiderstand aufweisen, wurde nicht bestimmt. Dass die Spanorientierung jedoch einen Einfluss auf das Verdichtungsverhalten der Spanmatte hat, konnte über die etwas stärker ausgeprägten Rohdichteprofile gezeigt werden. Das letztendlich beabsichtigte Ziel, nämlich die Aufrechterhaltung der Biegeeigenschaften durch eine stärkere Ausprägung des Rohdichteprofils (Verstärkung des Beplankungseffektes) trotz Holzreduktion, ließ sich mit dem gewählten Ansatz jedoch nicht erreichen. Zu erklären versucht wurde dies über den reduzierten Beitrag der Mittelschicht an den Biegeeigenschaften der Platte insgesamt. Schließlich wird, wenngleich Elastizität und Festigkeit der Deckschicht mit Zunahme der Dichte zunehmen, der Anteil der Mittelschicht am Plattenquerschnitt größer. Diese weist jedoch, sowohl aufgrund der reduzierten Dichte als auch aufgrund der Spanorientierung quer zur Richtung der bei Biegebelastung resultierenden Zug- bzw. Druckbelastung, reduzierte Eigenschaften auf. Anschaulich wird die Bedeutung der

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> (0,96 N/mm<sup>2</sup> - 0,46 N/mm<sup>2</sup>) / 0,46 N/mm<sup>2</sup> x 100 = 109 %

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> (0,52 N/mm<sup>2</sup> - 0,23 N/mm<sup>2</sup>) / 0,23 N/mm<sup>2</sup> x 100 = 126 %

Eigenschaften der Mittelschicht an den Biegeeigenschaften der gesamten Platte anhand der im vorherigen Kapitel aufgelisteten Modelle zur Vorausberechnung der Platteneigenschaften, nach denen die Eigenschaften der Deckschicht über einen Faktor auf Basis der Eigenschaften der Mittelschicht reduziert werden (z. B. Blaß und Fellmoser 2004) oder die Eigenschaften der Mittelschicht über einen Faktor auf Basis der Eigenschaften der Deckschicht erhöht werden (z. B. Plath 1971).

#### 5.6 Einsatz von dicken Spänen in der Mittelschicht

Publikation II hat ergeben, dass Späne größerer Dicke einen höheren Verdichtungswiderstand als Späne geringerer Dicke aufweisen. Dieses Ergebnis war Grundlage der Gestaltung der in Publikation IV sowie zum Teil in Publikation V beschriebenen Versuche, bei denen für die Herstellung von Laborspanplatten Mittelschichtspäne unterschiedlicher Dicke eingesetzt wurden.

In Publikation V hatte der Einsatz dickerer Mittelschichtspäne einen Anstieg der Deckschichtdichte zur Folge (im Fall des Vergleiches von "Plattentyp 2" mit "Plattentyp 4" statistisch signifikant). Weiter wurde bei nichtdichtekompensierten Daten mit steigender Spandicke ein leichter Anstieg der Biegefestigkeit festgestellt. Nach Dichtekompensation blieb dieser Zusammenhang teilweise, wenn auch weniger stark ausgeprägt, bestehen, verkehrte sich teilweise aber auch in einen nominellen Rückgang. Sowohl der Anstieg der Deckschichtdichte als auch der Rückgang der Biegefestigkeit ist beispielsweise in den Ergebnissen von Hänsel et al. (1988) wiederzufinden. Mit Blick auf die Rohdichteprofile aus Publikation IV ist jedoch anzumerken, dass zwischen Plattentyp 2 (Referenzspan in der Mittelschicht) und Plattentyp 4 (Span größerer Dicke in der Mittelschicht) nicht allein die Spandicke, sondern auch die Span-Herstellungsbedingungen variiert wurden (Technikum- vs. Industrie-Messerringzerspaner). Bei allein variierter Spandicke (Publikation IV, Zerspanung lediglich auf der Technikumsanlage), sind die Deckschichtdichten deutlich weniger unterschiedlich. Weiter zeigen Mittelschichtspäne unterschiedlicher Dicke ("Thin", "Normal", "Thick") hier zunächst steigende (mit Anstieg der Spandicke von dünn zu normal), dann fallende (mit Anstieg der Spandicke von normal zu dick) Biegeeigenschaften.

Festzuhalten ist, dass es der Versuchsaufbau von Publikation V nicht hergibt, Aussagen zum isolierten Einfluss der Mittelschichtspandicke auf die Platteneigenschaften zu liefern, da zusätzlich zur Spandicke auch die Herstellungsbedingungen variiert wurden. In Publikation IV war der Versuchsaufbau zwar praxisnah gestaltet (Spanherstellung mit unterschiedlichen Messerüberständen und anschließender Siebung), jedoch erscheint das Ergebnis - Maximum der Biegeeigenschaften bei Spandicke "Normal" - wenig plausibel. Eine Möglichkeit in Zukunft befriedigendere Ergebnisse zu erhalten wäre es, Musterspäne in Anlehnung an das Vorgehen von Post (1958) oder Turner (1954) zu verwenden.

Versuche zum Einfluss der Erhöhung der Dicke von Mittelschichtspänen auf die Eigenschaften von Spanplatte wurden von Hänsel et al. (1988) im Kontext der Bildung eines Modells für das Rohdichteprofil dreischichtiger Spanplatten durchgeführt. Die Ergebnisse hieraus sollen nachfolgend vorgestellt werden. Variiert wurde für Herstellung von Laborspanplatte das Spandickenverhältnis  $V_a$  (Mittel- zu Deckschichtspandicke) unter Variation der Mittelschichtspandicke (0,2 mm, 0,5 mm und 0,8 mm).

- "Niveaustufe -1": V<sub>a</sub> = 0,2 mm / 0,2 mm = 1
- "Niveaustufe 0": V<sub>a</sub> = 0,5 mm / 0,2 mm = 2,5
- "Niveaustufe +1": V<sub>a</sub> = 0,8 mm / 0,2 mm = 4

Die Versuche zeigten, dass zwar der Einsatz von dickeren Mittelschichtspänen zu einem Anstieg der Randzonendichte führt, nicht aber zu einem Anstieg der Biegefestigkeit. Als Ursache für die mit steigendem Spandickenverhältnis stärkere Ausprägung des Rohdichteprofils wurde die mit steigender Spandicke steigende Rückstellkraft (der Mittelschicht) angeführt, die eine stärkere Verdichtung der Deckschichten bewirkt. Als Grund für die mit steigendem Spandickenverhältnis sinkende Biegefestigkeit, wird die Verringerung des Schlankheitsgrades (der Mittelschichtspäne) vermutet.

#### 5.7 Spanform

Die Ergebnisse der Versuche zum Einfluss voluminös geformter Mittelschichtspäne auf die Platteneigenschaften wurden in den vorherigen Kapiteln bereits diskutiert. Im Folgenden liegt der Fokus auf den Ergebnissen von Publikation V, in deren Rahmen die Auswirkungen flachgeformter Deckschichtspäne auf die Eigenschaften holzreduzierten Spanplatten untersucht wurden. Im Wesentlichen zeigte sich, dass beim alternativen Einsatz flachgeformter Deckschichtspäne zwar stets ein weniger stark ausgeprägtes Rohdichteprofil erhalten wird, jedoch die Biegeeigenschaften die der Referenz übersteigen. Das führt vor Augen, dass die Spanform die Eigenschaften der Deckschicht (zum einen die Dichte, zum anderen die mechanischen Eigenschaften) und damit die Eigenschaften der Platte insgesamt beeinflusst. Die größere Elastizität und Festigkeit der Deckschichten aus flachgeformten Spänen ist entsprechend der Versuchsergebnisse nicht auf die Dichte, sondern die andersartige Struktur der Späne zurückzuführen. Zu vermuten ist, dass die andersartige Struktur der Späne eine andersartige Struktur des Spanverbundes (leistungsstärkere Elemente und Klebverbindungen zwischen diesen) zur Folge hat, die einen umfangreicheren Lastabtrag ermöglicht.

Ähnliche Ergebnisse erhielt auch Vos (2009) beim Vergleich der Eigenschaften von Platten aus Spänen, die aufgrund der Herstellung unterschiedliche Spanformen aufwiesen. Dünne Späne mit hohem Schlankheitsgrad, die mit einem Messerwellenzerspaner hergestellt wurden, eigneten sich im besonderen Maße für den Einsatz als Deckschichtmaterial (Anstieg der Biegeeigenschaften), während sich Späne konventioneller Herstellung (Messerringzerspaner) mit eher kubischer Form als besserer Mittelschichtspan herausstellten (höhere Querzugfestigkeit).

#### 5.8 Klebstoffmengenberechnung

Die Berechnung des oberflächenspezifischen Klebstoffanteils war die Weiterentwicklung der Überlegungen aus Publikation I zur Art und Weise der Reduktion des Holzeinsatzes und der damit verbundenen Veränderung des Klebstoffanteils. Ergänzend zu den dort aufgeschlüsselten Varianten ist im Fall der Veränderung des Spanmaterials überwiegend mit einer Veränderung der spezifischen Spanoberfläche zu rechnen, was eine Veränderung des oberflächenspezifischen Klebstoffanteils zur Folge hat. Dieser Umstand ist als weitere Einflussgröße zu berücksichtigen, setzt aber die Bestimmung der spezifischen Spanoberfläche voraus. Dies war bis *dato* jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Oberfläche lediglich auf Basis der drei Hauptachsen der räumlichen Ausdehnung (Länge, Breite, Dicke) anhand eines geometrischen Modells (z.B. Rechteck oder Ellipsoid) hergeleitet werden konnte. Eine automatisierte Vermessung der drei Hauptachsen sowie Berechnung der Spanoberfläche anhand des Höhenprofils vermessener Späne wurde erst kürzlich als Ergebnis eines Folgeprojektes (Benthien et al. 2019b) möglich.

Vor diesem Hintergrund soll für die Planung zukünftiger Versuche festgehalten werden, dass bei der Klebstoffmengenberechnung zu unterscheiden ist zwischen:

- Klebstoffmenge (-masse) in Bezug auf die Spanmasse (Klebstoffanteil)
- Klebstoffmenge in Bezug auf die Spanoberfläche

In Ermangelung eines Messsystems zur Bestimmung der Spanoberfläche wird die Klebstoffmenge zur Spanplattenherstellung auf Basis der Spantrockenmasse berechnet. Der sogenannte Klebstoffanteil gibt hierbei die Klebstoff-Feststoffmasse relativ zur Spantrockenmasse in Prozent an. Für die Güte der Verklebung der Späne untereinander dürfte jedoch vielmehr die spanoberflächen-spezifische Klebstoffmenge von Bedeutung sein, d. h. die Klebstoff-Feststoffmasse in Bezug auf die Spanoberfläche, angegeben in Gramm pro Quadratmeter (g/m<sup>2</sup>). Diesem Ansatz (mehr Klebstoff auf der Spanoberfläche führt zu besseren Platteneigenschaften) folgte auch Dunky (1988) bei der Betrachtung des Einflusses der Spangrößenverteilung auf den Beleimungsgrad. Diametral entgegen steht dieser Grundidee ("viel hilft viel") der Versuch von Stegmann (1965), verbesserte Platteneigenschaften beim Einsatz leichter Hölzer mit einer besseren Klebstoffausnutzung zu erklären, die sich aus der Verteilung des Klebstoffes auf eine größere Spanoberfläche ergibt, d. h. örtlich weniger Klebstoff führt zu besseren Platteneigenschaften.

In Publikation I wurde ohne Veränderung des Spanmaterials untersucht, welchen Einfluss die Art und Weise der Holzreduktion, insbesondere in der Mittelschicht und hier der Umgang mit dem Klebstoff (Methode 2: Klebstoffanteil konstant, Methode 4: Klebstoffmasse konstant), auf die Platteneigenschaften hat. Rückblickend ist festzuhalten, dass das Vorgehen bei Methode 4 ein denkbarer Fall ist und die Untersuchung natürlich Aufschluss darüber gibt, ob mit Holzreduktion sinkende mechanische Eigenschaften durch einen - relativ betrachtet - steigenden Klebstoffanteil kompensiert werden können. Für gewöhnlich wird man jedoch davon ausgehen, dass mit einer Reduktion des Holzeinsatzes eine simultane Reduktion der Klebstoffmenge und damit konstantem Klebstoffanteil stattfindet.

In Publikation IV wurde bei konstantem Klebstoffanteil der Einfluss der Mittelschichtspandicke auf die Platteneigenschaften untersucht. Zum Erhalt von Spänen unterschiedlicher Dicke wurde der Schneidenüberstand im Messerringzerspaner verändert. Auf Basis der ergänzend durchgeführten Partikelgrößenanalyse, insbesondere der Bildanalyse, wurde die Spanoberfläche berechnet und festgestellt, dass mit sinkender Spandicke die Oberfläche einer Menge Späne gleicher Masse steigt. Da der Klebstoffanteil konstant gehalten wurde, ergab sich hieraus, dass die oberflächen-spezifische Klebstoffmenge mit sinkender Spandicke sinkt. Folglich wurde nicht allein der Einfluss der Mittelschichtspandicke auf die Platteneigenschaften, sondern die gleichzeitige Variation von Spandicke und spanoberflächen-spezifischer Klebstoffmenge untersucht.

Werden Untersuchungen ohne Veränderung des Spanmaterials durchgeführt, so kann die Klebstoffmenge auf Basis der Spanmasse berechnet werden. Sobald jedoch das Spanmaterial variiert wird, ist es im Sinne der Konstanthaltung von Variablen zielführend, die Klebstoffmenge auf Basis der Spanoberfläche zu berechnen. Zumindest lassen sich bei diesem Vorgehen isoliert Effekte einer Veränderung der Spangeometrie beobachten. Solange noch kein Messsystem zur Bestimmung der Spanoberfläche zur Verfügung steht (sowohl für den Laborbetrieb, als auch für die industrielle Online-Anwendung) und es gängige Praxis ist, die Klebstoffmenge auf Basis der Spanmasse zu berechnen, ist bei Vergleichen eine Angabe des Klebstoffanteils wichtig.

Um in Versuchen zum Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften die quasi aneinander gekoppelten Einflussfaktoren Spangeometrie, Klebstoffanteil und spanoberflächen-spezifische Klebstoffmenge voneinander trennen zu können, sind folgende drei Versuchsaufbauten notwendig:

- Variation der Spangeometrie bei einheitlicher spanoberflächen-spezifischer Klebstoffmenge
- Variation der Spangeometrie bei einheitlichem (massebezogenen) Klebstoffanteil
- einheitliche Spangeometrie bei Variation der spanoberflächen-spezifischen Klebstoffmenge

Als Basisreferenz hat eine Platte aus Spanmaterial sowie mit spanoberflächen-spezifischer Klebstoffmenge und Klebstoffanteil, der in allen drei Versuchsaufbauten zu finden ist, zu dienen. Voraussetzung für quantitative Auswertung ist eine adäquate Partikelgrößenanalyse, die numerische Kennwerte liefert und vom Umfang einer statistischen Auswertung genügt.

Angeregt werden soll hier weiter, dass beim Beleimen der Späne die Viskosität des eingesetzten Klebstoffes sowie die Befüllung der Beleimtrommel konstant gehalten wird. Beim Vorbereiten der Prüfspanplattenherstellung unterschiedlichen Holzeinsatzes ist daher im Fall von Platten niedrigen Holzeinsatzes zu viel Material herzustellen und die überschüssige Menge zu verwerfen. Bei Veränderungen der eingesetzten Klebstoffmenge zum Konstanthalten der spanoberflächen-spezifischen Klebstoffmenge ist eine einheitliche Viskosität dadurch zu erreichen, dass zum Erreichen der Matten-Zielfeuchte nicht dem Klebstoff Wasser zugemischt wird, sondern die Späne vor der Beleimung auf die erforderliche Feuchte gebracht werden.

Zum Nachvollziehen des Einflusses der Anpassung der spanmassen-bezogenen Klebstoffmenge bei Variation des Spangeometrie mit dem Ziel die spanoberflächen-bezogenen Klebstoffmenge konstant zu halten, könnten Referenzuntersuchungen mit dem Automated Bonding Evaluation System (ABES) zielführend sein. Hilfreich könnte es in diesem Zusammenhang weiter sein, nicht nur die Querzugfestigkeit der Spanplatten, sondern auch die (Druck-) Scherfestigkeit bzw. Zugscherfestigkeit zu untersuchen.

#### 6 Fazit und Ausblick

Der verfolgte Ansatz, mit dem die wesentlichen Platteneigenschaften trotz Holzreduktion auf dem Niveau typischer Platten gehalten werden sollte, war entweder die Veränderung des Verdichtungswiderstandes der Mittel- bzw. Deckschicht, worüber eine Erhöhung der Deckschichtdichte erreicht werden sollte, oder die direkte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Deckschicht über die veränderte Geometrie der eingesetzten Späne. Die Veränderung des Verdichtungswiderstandes wurde versucht über die Geometrie oder der die Orientierung der eingesetzten Späne zu erreichen. Idee war hierbei, dass Mittelschichtspäne geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Form einen größeren Verdichtungswiderstand aufweisen, dünne, flache Deckschichtspäne hingegen einen geringen Verdichtungswiderstand. Idee bei der veränderten Orientierung (vertikal zur Plattenebene) der Mittelschichtspäne war es, die unterschiedliche Druckfestigkeit von Holz in seinen anatomischen Richtungen (longitudinal vs. quer zur Faser) zur Erreichung eines erhöhten Verdichtungswederstand zu nutzen. Hintergrund der Idee, die mechanischen Eigenschaften der Deckschicht genesen und Spangeometrie von einst nach Fahrni hergestellten Platten und zum anderen das Wissen, dass die Biegeeigenschaften von OSB die von gewöhnlicher Spanplatte prinzipiell übersteigen.

Im Kontext der Untersuchung der Eignung von Spänen geringer Schüttdichte aufgrund ihrer voluminösen Geometrie wurde das Verdichtungsverhältnis, definiert als der Quotient von Spanmattendicke zu Plattendicke, als möglicherweise wichtiger Kennwert betrachtet. Sowohl bei der näheren Befassung mit der Literatur als auch der experimentellen Bestimmung des Verdichtungswiderstandes von Spänen mit voluminöser Geometrie wurde festgestellt, dass vielmehr eine geringe Schüttdichte aufgrund der Dichte des Holzes als eine geringe Schüttdichte aufgrund der Spanform für einen hohen Verdichtungswiderstand verantwortlich ist. Folglich ist nicht das Verdichtungsverhältnis als Quotient aus Mattendichte zu Plattendicke, sondern der Quotient von Holzdichte zu Plattendichte ein sinnvoller Kennwert.

Bei der Untersuchung von Platten mit vertikaler Spanorientierung in der Mittelschicht wurde zwar ein Anstieg der Querzugfestigkeit festgestellt, der beabsichtigte Anstieg von Deckschichtdichte und Biegeeigenschaften konnte jedoch nicht erreicht werden. Das zeigt zum einen, dass mit der vertikalen Spanorientierung nicht die beabsichtigt stärkere Verdichtung der Deckschichtspäne erreicht werden konnte, und zum anderen, dass die größere Zugfestigkeit in longitudinaler Holzrichtung zwar quer zur Plattenebene einen positiven Beitrag liefert (Querzugfestigkeit), die folglich in Plattenebene geringere Zug- und Druckfestigkeit der Mittelschicht sich jedoch negativ auf die Biegeeigenschaften auswirkt. Auch durch den Einsatz von Mittelschichtspänen großer Dicke konnte der beabsichtigte Anstieg von Deckschichtdichte und Biegeeigenschaften nicht erreicht werden.

Wenngleich es zentraler Ansatz der Arbeit war, über den Verdichtungswiderstand ein stärker ausgeprägtes Rohdichteprofil zu erzeugen, wurde kein Versuchsaufbau so gestaltet, dass die Möglichkeit dies zu erreichen direkt zu prüfen war. Dass der Verdichtungswiderstand von Deck- und Mittelschichtspänen die Ausprägung des Rohdichteprofils bestimmt, wurde jedoch anhand von Literatur belegt Keylwerth (1958). Die Bedeutung stark verdichteter Deckschickschichten großer Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften (Beplankungseffekt) für die Biegeeigenschaften wurde mit deren Entfernung von der neutralen Faser und dem dort verorteten Maximum der resultierenden Druck- bzw. Zugspannung argumentiert. Weiter wurde auf Modelle zur Vorausberechnung der Eigenschaften mehrschichtigen Verbundmaterials verwiesen (Keylwerth 1958, Plath 1971, Hänsel und Kühne 1988, Blaß und Fellmoser 2004).

Beim Einsatz von dünnen, flachen Spänen als Deckschichtmaterial wurde gezeigt, dass es nicht zu einer stärkeren Ausprägung der Deckschichtdichten, wohl aber zu einem deutlichen Anstieg der Biegeeigenschaften aufgrund der Spangeometrie kommt. Hierbei erreichten die Biegeeigenschaften holzreduzierter Platten das Niveau von Platten herkömmlicher Dichte.

Insgesamt festzuhalten ist, dass über den Einsatz von Spänen typischer Geometrie, sowohl Form als auch Abmessungen, und der damit erwarteten Veränderung von Verdichtungswiderstand und Rohdichteprofil, keine Anhebung der Biegeeigenschaften von holzreduzierten Platten auf das Niveau herkömmlicher Platten erreicht werden konnte. Gezeigt wurde hingegen, dass sich die Biegeeigenschaften holzreduzierter Platten direkt mittels dünner, flacher Deckschichtspäne auf dem Niveau herkömmlicher Platten halten lassen und die vertikale Orientierung der Mittelschichtspäne unabhängig von der Plattendichte zu einer Verdopplung der Querzugfestigkeit führt. Interessant wäre es nun, in der Mittelschicht vertikal orientierte Späne mit dünnen, flachen Spänen in der Deckschicht zu kombinieren. Wenn hierbei sowohl der positive Effekt der Spangeometrie der Deckschichtspäne auf die Biegeeigenschaften und der positive Effekt der Spanorientierung der Mittelschichtspäne bestehen bleiben würde, so würden sich holzreduzierte Platten mit einer Dichte von 500 kg/m<sup>3</sup> mit den Eigenschaften typischer Platten herstellen lassen. Zu bezweifeln ist jedoch, dass ein solcher Plattenaufbau ökonomisch tragfähig ist, da der herkömmliche Aufbau einer Spanplattenlinie um Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung derartiger Deckschichtspäne erweitert sowie die Streuung der Mittelschichtspäne umgestaltet werden müsste. Erschwerend käme weiter hinzu, dass - ähnlich wie bei der Herstellung von OSB - vergleichsweise hochwertiges Stammholz für die Spanherstellung notwendig ist und, wenn keine abschließende Feinschicht aufgebracht wird, Deckschichtoberflächen erhalten werden, die sich nicht für eine direkte Beschichtung eignen.

Versteht man Spanplatte als mehrschichtiges Verbundmaterial, bei dem nicht wie bei einem Sandwichaufbau allein die Deckschichten die bei Biegebelastung resultierenden Zug- und Druckspannungen aufnehmen, sondern auch die Mittelschicht Zug- und Druckspannungen aufnimmt, könnte für die Abschätzung der Effekte von Rezepturveränderungen ein Modell zur Vorausberechnung der Eigenschaften hilfreich sein, das die Platteneigenschaften aufgrund von Dichte sowie makroskopischer (Geometrie) und mikroskopischer (Holzart, Faserverlauf) Spaneigenschaften berücksichtigt. Hierfür müssten jedoch zunächst für verschiedene Dichten die Einflüsse einzelner Parameter (z. B. nur die Spanlänge) auf die Materialeigenschaften isoliert bestimmt und ein geeignetes Modell erstellt werden. Hiermit ließen sich dann aber negative Begleiteffekte erkennen, wie beispielsweise Eigenschaftsverringerungen aufgrund von Maßnahmen zur Erhöhung des Verdichtungswiderstandes, wie sie beispielsweise beim Einsatz von Spänen mit zur Spanlängsachse abweichender Faserrichtung zu erwarten sind.

Bei Arbeiten mit Spänen unterschiedlicher Geometrie sollte zukünftig die spanoberflächen-spezifische Klebstoffmenge Beachtung finden. Schließlich ändert sich mit Variation der Spangeometrie in aller Regel die Spanoberfläche und damit, bei konstantem Beleimungsgrad, die effektiv zur Verklebung der Späne zur Verfügung stehende oberflächen-spezifische Klebstoffmenge. Während dies bislang aufgrund fehlender Messtechnik nur ungenau und mit großem Aufwand möglich war, lassen sich mit der Entwicklung der dreidimensionalen Spanvermessung aktuell sowohl die Spanabmessungen als auch die Spanoberfläche automatisiert vermessen. Neben möglichen Klebstoffeinsparungen in der Spanplattenproduktion durch die Optimierung der Zerspanungsanlagen sowie die Anpassung der Klebstoffmenge an die aktuell vorliegende Spanqualität, ist hierdurch der Einfluss einer variierenden oberflächen-spezifischen Klebstoffmenge bei der Bestimmung anderer Einflussgrößen auf die Platteneigenschaften zu eliminieren.

Mit der vorliegenden Arbeit bzw. den zusammengefassten Publikationen konnten Teilfragestellungen (voluminöse Spanform-Verdichtungswiderstand, vertikale Spanorientierung in der Mittelschicht, direkte Eigenschaftsverbesserung aufgrund dünner, flächiger Deckschichtspäne) im Kontext der Herstellung holzreduzierter Spanplatten beantwortet werden. Weiter wurden mögliche Details für künftige Untersuchungen (Optimierung von Zerspanung durch Spangeometrieüberwachung und Klebstoffmengenberechnung auf Basis der Spangeometrie) näher beschrieben.

#### Literaturverzeichnis

- Anonymous (2019) Merkblatt zu ansetzbaren Rechenwerten für die Bemessung nach DIN EN 1995-1-1 für Vollholz [...]. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Überwachungsgemeinschaft KVH e.V., 14. Auflage, URL: https://informationsdienstholz.de/fileadmin/Publikationen/6\_Arbeitshilfen/Merkblatt\_Produktregeln\_DIN\_EN\_1995\_1\_1 \_\_Sept\_2019.pdf (letzter Zugriff: 19.10.2021)
- Barrett PJ (1980) The shape of rock particles, a critical review. Sedimentology 27:291-303
- Benthien, JT, Bähnisch C, Heldner S, Ohlmeyer M (2014) Effect of fiber size distribution on medium-denstiy fibreboard properties caused by varied streaming time and temperature of defibration process. Wood Fiber Sci 46:175–185
- Benthien JT, Ohlmeyer (2016) Zusammenhang von Spanqualität und Platteneigenschaften Eine Untersuchung von Spänen verschiedener Hersteller. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 38 p, Thünen Working Paper 52
- Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. Eur J Wood Wood Prod 75(1):55-62
- Benthien JT, Ohlmeyer M, Schneider M, Stehle T (2018) Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. Eur J Wood Wood Prod 76(3):937-945
- Benthien JT, Ohlmeyer M (2018a) Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation. Eur J Wood Wood Prod 76(3):1087-1091
- Benthien JT, Ohlmeyer (2018b) Entwicklung leichter Holzwerkstoffe unter Anwendung definierter Spangeometrie und Partikelmorphologie - Schlussbericht zum Teilvorhaben 1. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 25 p, Thünen Working Paper 95
- Benthien JT, Lüdtke J, Ohlmeyer M (2019a) Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. Eur J Wood Wood Prod 77(6):1029-1043
- Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer M (2019b) Vorteile durch bildanalytisches Messen der Spandicken: Neue Technik zur Überwachung der Spangeometrie vereinfacht Steuerung und Optimierung des Spanplattenprozesses. Holz-Zentralblatt 145(50):1101-1103
- Benthien JT, Ohlmeyer M (2020) Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard. MDPI Fibers 8(7):46
- Benthien JT, Engehausen N, Lüdtke J (2022) 3D Spanvermessung mit Laser-Profilsensoren: Betrachtung von Technologie, Potenzial im Prozess und Leistungsdaten hinsichtlich der Messkopfauswahl. Holz-Zentralblatt 148(32):541-543
- Blaß HJ, Fellmoser P (2004) Design of solid wood panels with cross layers. 8th World Conference on Timber Engineering, 14.–17.06.2004, Lahti
- Boehme C (1992) Die Bedeutung des Rohdichteprofils für MDF. Holz Roh Werk 50(1):18-24
- Brumbaugh J (1960) Effect of flake dimensions on properties of particle boards. For Prod J 10(5):243-246
- Deppe HJ (2003) Spänesichter. In: Holzlexikon, Band 2 S-Z. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen. ISBN: 3-87181-355-9
- Dudenredaktion (o. J.) "leicht" auf Duden online. URL: http://www.duden.de/node/853152/revisions/1613540/view (Abrufdatum: 21.11.2017)
- Dunky M (1988) Einfluß der Spangrößenverteilung auf den Beleimungsgrad der Späne. Holzf Holzverw 40:6-133

- Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 3-540-42980-8
- EPF (2020) European Panel Federation, Annual Report 2019-2020
- FAO (2020) Food and Agriculture Organisation of the United Nations, FAOSTAT, Forestry Production and Trade (Abrufdatum: 07.12.2020)
- Gottlöber C (2014) Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen Grundlagen Systematik Modellierung -Prozessgestaltung. Carl Hanser Verlag, München. ISBN 978-3-446-44058-6
- Grigoriou A (1981) Die Eigenschaften von Feinspänen aus sieben veschiedenen Holzarten. Holzforschung und Holzverwertung 33(1):1-5
- Hasch J (2017) Innovationen in der HWS-Industrie. 5. Grecon Holzwerkstoffsymposium. Bad Homburg, Deutschland, 20. Oktober 2017
- Haas Gv, Frühwald A (2000) Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten von Faser-, Span- und OSB-Matten. Holz Roh Werkst 58(5):317-323
- Hänsel A, Kühne G (1988) Untersuchungen zur Mechanik der Spanplatten. Holzf Holzverw 40(1):1-5
- Hänsel A, Niemz P, Brade F (1988) Untersuchungen zur Bildung eines Modells für das Rohdichteprofil im Querschnitt dreischichtiger Spanplatten. Holz Roh Werkst 46(4):125-132
- Hubbard E (1887) Die Verwertung der Holzabfälle. Hartleben, 183
- Hse CY (1975) Properties of flakeboards from hardwoods growing on southern pine sites. For Prod J 25(3):48-53
- Irle M, Barbu MC (2010) Wood-based panel technology. In: Thoemen H, Irle M, Sernek M (eds) Wood-based panels—an introduction for specialists. Brunel University Press, London, pp 1–94. ISBN 978-1-902316-82-6
- Istek A, Siradag H (2013) The effect of density on particleboard properties. In: Proceedings of the International Caucasian Forestry Symposium (ICFS), Artvin, Türkei, 25.–26. Oktober 2013, pp 932–938
- Istek A, Aydin U, Özlüsoylu I (2018) The effect of chip size on the particleboard properties. In Proceedings of the International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS), Kastamouno, Turkey, 26– 29 April 2018; pp. 439–444
- Kehr E (1974) Zur Entwicklung der Eigenschaften von Spanplatten für den Möbelbau. Holztechnologie 15(3):143-149
- Keylwerth R (1958) Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte. Holz Roh Werkst 16(11):419-430
- Keylwerth R (1959) Erreichte und erreichbare Verminderung der Anisotropie un Holzwerkstoff-Platten. Holz Roh Werk 17(6):234-238
- Kitahara K, Kasagi K (1955) Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chip-board. Wood Ind 10:406-412
- Klaudiitz W (1955) Entwicklung, Stand und holzwirtschaftliche Bedeutung der Holzspanplattenherstellung. Holz Roh Werkst 13(11):405-421
- Klauditz W, Stegmann G (1957) Über die Eignung von Pappelholz zur Herstellung von Holzspanplatten. Holzforschung 11(5/6):174–179
- Knauf M (2015) Understanding the consumer: Multi-modal market research on consumer attitudes in Germany towards lightweight furniture and lightweight materials in furniture design. Eur J Wood Wood Prod 73(2):259–270
- Liiri O (1961) Investigations on properties of wood particle boards. Paperi Puu 43(1):3-18

- Liiri O, Kivistö A, Saarinen A (1977) Der Einfluss von Holzart, Spangröße und Bindemittel auf die Festigkeit und die Quellung von Spanplatten mit höheren elastomechanischen Eigenschaften. Holzforsch Holzverwert 29(6):117-122
- Lüdtke J (2017) Vorlesungsskript Mechanische Holztechnologie, Universität Hamburg, WS 2016/17
- May HA (1973) Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Beleimung von Spänen in industriellen Beleimungsmaschinen bei der Holzspanplattenherstellung. Braunschweig, WKI-Bericht Nr. 2. In: May HA (1982) Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 2: Möglichkeiten der Anwendung industrieüblicher Sortierverfahren zur Beurteilung von Spangemischen. Holz Roh Werkst 40(8):303-306
- May HA (1974) Herstellung von Holzspanlatten mit orientierten Spänen und unterschiedlicher Formgebung. Holz Roh Werk 32(5):169-176
- May HA (1977) Zur Mechanik der Holzspanplatten unter besonderer Berücksichtigung der Rohdichte-Differenzierung und Rohstoffzusammensetzung. Holz Roh Werkst 35(10):385-387
- May HA (1982) Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten - Teil 2: Möglichkeiten der Anwendung industrieüblicher Sortierverfahren zur Beurteilung von Spangemischen. Holz Roh Werkst 40(8):303-306
- Michanickl A (2004) Light Wood Based Panels State of the Art and Trends. 4. Europäisches Holzwerkstoff-Symposium. Hannover, Deutschland, 15-17 September 2004
- Mihailova J, Tritchkov N (2009) Theoretical model for determination of the maximum difference in particleboards vertical density. In: Proceedings of COST Action E49, Processes and performance of woodbased panels - adding value through physical functionality, 28.-29. April 2009. Istanbul, Türkei
- Nelis PA, Michaelis F, Krause KC, May C (2018) Kiri wood (*Paulownia tomentosa*): can it improve the performance of particleboards?. Eur J Wood Wood Prod 76(2):445-453
- Nelis PA, May C (2019) Improved strength properties of three-layered particleboards with different core and surface layers based on kiri wood (*Paulownia* spp.). Eur J Wood Wood Prod 77(5):761-769
- Neumann C (1951) Die Herstellung von Spänen für Holzspanplatten. Diplomarbeit. Hamburg: Universität Hamburg
- Niemz P (1982) Untersuchungen zum Einfluß der Struktur auf die Eigenschaften von Spanplatten Teil 1. Einfluß von Partikelformat, Rohdichte, Festharzanteil und Festparaffinanteil. Holztechnologie 23(4):206-213
- Niemz P, Bauer S (1991) Beziehung zwischen Struktur und Eigenschaften von Spanplatten. Holzforsch Holzverwert 43(3):68-70
- Niemz P, Schweitzer F (1990) Einfluss ausgewählter Strukturparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit von Spanplatten. Holz Roh Werkst 48(10):361-364
- Niemz P, Wenk S (1989) Kenngrößen zur Beurteilung von Spangemischen und deren Meßbarkeit. Holztechnologie 30(3):117-122
- Niemz P, Wagenführ A, Hänsel A (1988) Beziehung zwischen Struktur und Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen. Teil 1. Holztechnologie 29(1):7-11
- Paulitsch M, Barbu MC (2015) Holzwerkstoffe der Moderne. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. KG, Leinfelden-Echterdingen
- Plath E (1963) Einfluss der Rohdichte auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen. Holz Roh Werk 21(3):104-108
- Plath E (1971) Beitrag zur Mechanik der Holzspanplatten. Holz Roh Werk 29(11):377-382

- Plath E, Schnitzler E (1974) Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten. Holz Roh Werk 32(11):443-449
- Post PW (1958) Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake boards. For Prod J 8(10):317-322
- Rowell RM (Ed.) (2013) Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press
- Schirp A (2009) Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt: "Entwicklung einer extraleichten Spanplatte für den Möbelbau auf Basis von Schaumklebstoffen"; Förderkennzeichen 01RI05141. https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01RI05141\_-\_Abschlussbericht.pdf (letzter Zugriff: 11.08.2020)
- Schneider M, Stehle T (2016) Schlussbericht zum Vorhaben "Entwicklung leichter Holzwerkstoffe unter Anwendung definierter Spanorientierung und Partikelmorphologie - Teilvorhaben 2". Projektdatenbank der FNR. https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22012814.pdf (letzter Zugriff: 24.12.2020)
- Schneider M, Stehle T, Benthien JT, Ohlmeyer M (2018) Stiffness modelling of particles in the core layer for the manufacturing of wood-reduced particleboard. Eur J Wood Wood Prod 76(3):947-952
- Seppke B, Bähnisch C, Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer MA (2015) Concurrent Skeleton-based Approach for the Characterization of Wood Fibers with Sub-pixel Precision for Fiber Board Production. In Proceedings of the 10th International Conference on Mass Data Analysis of Images and Signals (MDA), Hamburg, Germany, 11–14 July 2015
- Sperry JS, Hacke UG, Pittermann J (2006) Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. American journal of botany, 93(10):1490-1500.
- Sosnin MJ (1974) Untersuchung der Elastizität und Verformbarkeit der Spanvliese bei der Spanplattenpressung. Holztechnologie 15(1):45-48
- Stegmann G, Durst J, Kratz W (1965) Pappelschichtholz als Rohstoff der Spanplattenindustrie. Holzfor Holzverw 17(3):37-43
- Suzuki M, Kato T (1989) Influence of dependent variables on the properties of medium-density fiberboard. Mokuzai Gakkaishi 35(1):8-13
- Teichgräber R (1966) Eigenschaften und Eigenschaftsprüfung. In: Kollmann F (1966) Holzwerkstoffe -Holzspanplatten und Holzspanformlinge : Rohstoffe, Herstellung, Plankosten, Qualitätskontrolle usw.. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, Germany, ISBN 978-3-642-50247-7
- Thoemen H (2008) Lightweight panels for the European furniture industry: Some recent developments. COST Action 49, Processes and performance of wood-based panels, lightweight wood-based composites, production, properties and usage. Bled, Slowenien, 23–25 Juni 2008
- Tröger J, Groß L (2010) Herstellung eines federelastischen Spangutes geringer Dichte als Matrix für Schüttdämmstoffe, für plattenförmige Dämmstoffe und leichte Spanplatten. In: Braun S., Maier W., Zirkelbach S. (eds) Intelligent produzieren. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13101-1\_30
- Turner HD (1954) Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin-bonded wood-particle panels. For Prod J 4(5):210-223
- Vos H (2009) Entwicklung von leichten Holzwerkstoffen aus Abies grandis (Küstentanne) und Fagus sylvatica (Buche). Dissertation. Göttingen: Universität Göttingen
- Wiedemann J (2007) Leichtbau. Elemente und Konstruktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Wyss O (1981) Zur Patentgeschichte der Spanplatte Teil 1. Holz Roh Werkst 39(10):399-404
- WPIF (2014) Wood Panel Industries Federation, Panel Guide Version 4, ISBN 978-1-909594-21-0
### Normenverzeichnis

DIN 1306:1984-06, Dichte; Begriffe, Angaben

- DIN EN 1995-1-1:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- DIN 52182:1976-09, Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte
- DIN 52183:1977-11, Bestimmung des Feuchtegehaltes
- DIN 52185:1976-09, Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser
- DIN 52192:1979-05, Bestimmung der Rohdichte
- DIN 66165-1:2016-08, Partikelgrößenanalyse Siebanalyse Teil 1: Grundlagen
- DIN CEN/TS 16368:2014-06, Leichte Spanplatten Anforderungen
- DIN EN 300:2006-09, Platten aus langen, schlanken, ausgerichteten Spänen (OSB)
- DIN EN 309:2005-04, Spanplatten Definition und Klassifikation
- DIN EN 310:1993-08, Holzholzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Bigefestigkeit
- DIN EN 311:2002-08, Holzwerkstoffe Abhebefestigkeit der Oberfläche Prüfverfahren
- DIN EN 312:2010-12, Spanplatten Anforderungen
- DIN EN 317:1993-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung
- DIN EN 319:1993-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene
- DIN EN 322:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes
- DIN EN 323:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung der Rohdichte
- DIN EN 408:2012-10, Holzbauwerke Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- DIN ISO 9276-1:2004-09, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen Teil 1: Grafische Darstellung (ISO 9276-1:1998)
- DIN ISO 9276-6:2012-01, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln (ISO 9276-6:2008)
- ISO 13322-1:2014-05, Partikelgrößenanalyse Bildanalyseverfahren Teil 1: Statisches Bildanalyseverfahren
- ISO 13322-2:2006-11, Partikelgrößenanalyse Bildanalyseverfahren Teil 2: Dynamische Bildanalyseverfahren

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rohdichteprofil einer ungeschliffenen Spanplatte (schematisiert). r <sub>max</sub> = Rohdichtemaximum; r <sub>min</sub> = Rohdichteminimum; r = mittlere Rohdichte; DS =
Abbildung 2:	NOVORAN - Elechenäne" mit Zentimetermeßsteh (Neumann 1951) 10
Abbildung 3:	"NOVOPAN - Platte" (Neumann 1951)10
Abbildung 4:	Schema zur Systematisierung von Maßnahmen, mit denen die Eigenschaften holzreduzierter Spanplatte auf dem Niveau herkömmlicher Platten gehalten oder funktionsoptimierte Platten erhalten werden
Abbildung 5:	Veranschaulichung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Spangeometrie und Spanabmessungen sowie Spanform (links) und Spanabmessungen sowie Spanform und Spanoberfläche bzw. Spanvolumen (rechts)
Abbildung 6:	Schematische Darstellung zur Erklärung der Schnittrichtungen bei Holz (Gottlöber 2014) sowie der holzanatomischen Richtungen, Abbildung der Hackrotortrommel entliehen auf www.hombak.com18
Abbildung 7:	Skizzierte Darstellung der geometrischen Eigenschaften typischer Späne für die Spanplattenherstellung: (1) Deckschicht-Feinspan, (2) Mittelschichtspan, (3) Schlagspan (Zusammenstellung aus Abbildung 4.17, Dunky und Niemz 2002)19
Abbildung 8:	Fotografien zufällig ausgewählter Mittelschichtspäne (Bildquelle: Thünen-Institut für Holzforschung) mit Zentimetermaßstab20
Abbildung 9:	Spanne der Abmessungen von Deck- (DS) und Mittelschichtspänen (MS) (Dunky und Niemz 2002, Benthien und Ohlmeyer 2016) sowie Durchmesser von Tracheiden (Sperry et al. 2006) (logarithmisch skalierte Abszisse) (Benthien et al. 2022)22
Abbildung 10:	Späne innovativer Geometrie (Inno IV) sowie Fraktionen einer Hombak- Messerwellenzerspaner-Herstellung (Hom)
Abbildung 11:	Darstellung der von Hse (1975) gefundenen Zusammenhänge zwischen jeweils dem Verdichtungsverhältnis und der Biegefestigkeit (MOR), dem Biege-Elastizitätsmodul (MOE) und der Querzugfestigkeit (IB)46
Abbildung 12:	Auswertung der in Tabelle 6 aufgelisteten Daten von Grigoriou (1981), (a) Holzdichte gegen Schüttdichte, (b) Schüttdichte gegen Kompressibilität

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl an Spannen geometrischer Kenngrößen typischer Späne (zusammengestellt
	aus Tabelle 4.4, Dunky und Niemz 2002)21
Tabelle 3:	Deck- zu Mittelschichtverhältnis und Klebstoffanteil in der Mittelschicht in
	Abhängigkeit von Methode und Umfang der Holzreduktion (Zieldichte)
Tabelle 4:	Ergebnisse der beispielhaften Berechnung der Holzdichte für Plattendichten von 500 und 650 kg/m <sup>3</sup> unter Annahme der Angaben von Irle und Barbu (2010) und Dunky
	und Niemz (2002) zum Grad der Verdichtung bzw. dem Verdichtungsverhaltnis45
Tabelle 6:	Betrachtete Daten aus Grigoriou (1981)

Publikation I

Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. Eur J Wood Wood Prod 75[1]:55-62

Publikation II

Benthien JT, Ohlmeyer M, Schneider M, Stehle T (2018) Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. Eur J Wood Wood Prod 76(3):937-945

**Publikation III** 

Benthien JT, Ohlmeyer M (2018a) Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation. Eur J Wood Wood Prod 76(3):1087-1091

**Publikation IV** 

Benthien JT, Lüdtke J, Ohlmeyer M (2019a) Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. Eur J Wood Wood Prod 77(6):1029-1043

Publikation V

Benthien JT, Ohlmeyer M (2020) Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard. MDPI Fibers 8(7):46 Publikation I

ORIGINAL



### Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards

Jan T. Benthien<sup>1</sup> · Martin Ohlmeyer<sup>1</sup>

Received: 7 July 2015/Published online: 5 May 2016 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract As a response to increased costs and a shortage in wood supply it is a current approach to reduce the amount of material in the manufacturing process of particleboard (PB). However, the production of lightweight PB by simply reducing density results in decreased panel properties. Thus, investigations to re-engineer the panel's core layer are required in order to achieve density-reduced panels which meet minimum property requirements (e.g., EN 312), edge processability and surface coatability. The intention of the present paper is to investigate the influence of potentially occurring changes in the face-to-core layer ratio (35/65...57/43) and core layer resin content (8 %...22.3 %) on panel properties when reducing the density from 650 to 400 kg/m<sup>3</sup>.

#### **1** Introduction

With an annual production of about 28.4 million  $m^3$  in 2013, particleboard (PB) is the most important type of wood-based panel (WBP) in Europe and, with a share of 68 % of the overall sales, used mainly in the furniture sector (EPF 2013). The mean density of conventional particleboards ranges between about 600 and 680 kg/m<sup>3</sup> (WPIF 2014).

The use of PB for furniture application has not really been questioned for long time, because its relatively low price, diverse applicability and good machinability superpose its quite high density and consequently wood demand

Jan T. Benthien jan.benthien@thuenen.de for production. In contrast, during the 1950s and 1960s driven by the wood shortage after World War II—light furniture constructions were quite common. Due to the increased use of PB and medium-density fiberboard (MDF) for furniture construction, furniture weight later increased significantly. However, changes in the furniture market (supply of knock-down furniture in cash-and-carry markets) and design (trend to thicker components) let the furniture dealer IKEA pick up principles of lightweight construction in the early 1980s and start to reduce furniture weight since then (Thoemen 2008).

Since the early 2000s lightweight increasingly entered the awareness of the WBP and furniture industry, because of potentially reducible transportation costs and design preferences (Michanickl 2004). Balducci et al. (2008) later mentioned increased costs and a shortage in the supply of wood in the context of the development of innovative PBs. Today, expected limitations in the availability of raw material are stated as reasons for the world's leading furniture dealer IKEA to expand its use of lightweight WBP for furniture production to about 70 % during the next decade (Berggren 2014). Thus, lightweight construction is a topic of current interest for suppliers in the furniture industry, especially particleboard producers.

With the intention to develop PB of reduced density without adding any non-wood fillers or density irregularities in the panels' plane direction, the compression resistance of the particle mat—in particular of the core layer particles has to be increased so that highly compacted face layers and a low density core can be achieved. Beside press parameters (compression velocity, pressure and press temperature), the compression resistance can be modified by varying the particle mat structure (Plath and Schnitzler 1974). Under "particle mat structure", the distribution of the material on face and core layer, wood species, particle shape and

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstraße 91c, 21031 Hamburg, Germany

dimension, resin content in face and core layer and the moisture content in the face and core layer are understood here. Assuming press parameters and moisture content are optimized to a great extent today, and wood species are fixed due to the location of the plant, particle geometry, resin content and the distribution of particle material on face and core layer seem to be the only adjustable variables.

Whereas particle geometry is one variable in the development of lightweight PB, this paper investigates the influences of changes in the face-to-core layer ratio and core layer resin content on panel properties, as these effects need to be understood first as a basis for further research on particle geometry.

#### 2 Materials and methods

#### 2.1 Panel manufacturing

Three-layer panels with a nominal thickness of 16 mm were produced on a computer-controlled laboratory hot press. Wood particles (face and core layer particles), liquid urea-formaldehyde (UF) resin and paraffin emulsion from a commercial particleboard plant (Kronopol Sp z o.o., Zary, Poland) were used as feedstock. Ammonium nitrate (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) solution with 40 % solid content was used as hardener. The solid content of the UF-resin was 67 %. The solid content of the paraffin emulsion was 50 %.

The particles were glued in a rotary drum blender, equipped with an air-atomizing spray system. Prior to application, 1 % hardener, 1 % urea (both based on the resin solid content) and 0.5 % paraffin emulsion (based on the dry wood mass) were added in the case of the face-layer material. In the case of the core-layer material, 3 % hardener and neither urea nor paraffin were added as it is practiced in commercial production. The amount of additional water was calculated with regard to particle moisture content and added to the resin solution. A target moisture content of 11 % in the face layers and 8 % in the core layer were calculated. Resin content was 11 % (based on dry wood mass) in the face layers while the resin content in the core layer was adjusted with respect to experimental set-up between 8 and 22.3 %. According to target density and relation of face-to-core layer ratio (with respect to experimental set-up between 650 and 400 kg/m<sup>3</sup> respectively 35/65 and 57/43), particles were weighed and formed into mats on an aluminum caul plate using a  $695 \times 595 \text{ mm}^2$ forming box. After removing the forming box, a second such plate was laid on the top of the mat while both were covered with siliconized paper to prevent adherence between panel and caul plates.

At a press plate temperature of 200 °C, the mats were compressed with a pressing time factor of 8 mm per second (effective press time: 128 s). Closing time of the press was 6 s. Within the first 20 s after press closure, a thickness of 14.5 mm was strived for at a maximum specific pressure of 4 N/mm<sup>2</sup>. During the following 100 s, the maximum specific pressure was reduced from 1.5 to 1 N/mm<sup>2</sup> while the thickness was increased to nominal panel thickness (16 mm). Plate positions were kept constant for 8 s while the specific pressure was decreased further stepwise (0.5 N/mm<sup>2</sup> per step). After hot-pressing, the panels were cooled down at ambient conditions and then stored in a climatic chamber at 20 °C and 65 % relative humidity (RH) prior to sample cutting.

#### 2.2 Experimental design

A total of 51 experimental PBs were tested, three panels for each of the 17 test formulations. For each of the four raw material formulation variations (manufacturing Methods 1 to 4), target densities of 575, 500, 450 and 400 kg/m<sup>3</sup> were selected (meaning 16 material formulations). A 17th panel type with a density of 650 kg/m<sup>3</sup> was manufactured as a reference and starting point for the variation of density and material composition.

In the first method (Method 1), decreased densities were achieved by reducing the amount of glued particles in the face and core layer simultaneously. The face-to-core layer ratio was kept consistent at 35/65 and the core layer resin content (based on dry particle mass) at 8 %. In the case of Method 2, density reduction was achieved by reducing the amount of glued particles in the core layer only, which results in a changed face-to-core layer ratio at a consistent core layer resin content of 8 %. With respect to target panel densities, the face-to-core layer ratios were 40/60 (575 kg/ m<sup>3</sup>), 46/54 (500 kg/m<sup>3</sup>), 51/49 (450 kg/m<sup>3</sup>) and 57/43  $(400 \text{ kg/m}^3)$ . Methods 3 and 4 follow substantially the principle of Method 2, while here the core layer resin content was increased. In the case of Method 4, the mass of resin in the core layer was kept on the level of the panels with a density of 650 kg/m<sup>3</sup>. This leads to resin contents (resin solid content per dry wood mass) of 9.9 % (575 kg/  $m^3$ ), 13 % (500 kg/m<sup>3</sup>), 16.4 % (450 kg/m<sup>3</sup>) and 22.3 %  $(400 \text{ kg/m}^3)$ . In the case of Method 3, the resin content was set to 14 % for the panel density 400 kg/m<sup>3</sup> and linearly interpolated down to 8 % at 650 kg/m<sup>3</sup>. This procedure results in resin contents of 9.8 % (575 kg/m<sup>3</sup>), 11.6 %  $(500 \text{ kg/m}^3)$  and 12.8 % (450 kg/m<sup>3</sup>). Table 1 gives an overview of the varied parameters.

#### 2.3 Sample preparation and testing procedures

Prior to sample cutting, test panels were trimmed to a size of approximately  $500 \times 400 \text{ mm}^2$ . The number of test specimens for each formulation was 12 for modulus of

 Table 1
 Face-to-core layer ratio and core layer resin content at investigated target densities of the four material formulations (Methods 1–4) tested

Target density (kg/m <sup>3</sup> )	Method 1		Method	2	Method	3	Method 4	
	FL/CL	RC (%)	FL/CL	RC (%)	FL/CL	RC (%)	FL/CL	RC (%)
650	35/65	8	35/65	8	35/65	8	35/65	8
575	35/65	8	40/60	8	40/60	9.8	40/60	9.9
500	35/65	8	46/54	8	46/54	11.6	46/54	13
450	35/65	8	51/49	8	51/49	12.8	51/49	16.4
400	35/65	8	57/43	8	57/43	14	57/43	22.3

FL face layer, CL core layer, RC resin content

elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) (EN 310), 24 for internal bond strength (IB) (EN 319), 15 for thickness swelling (TS) (EN 317), 15 for dimensional changes associated with changes in RH (EN 318) and three for measuring the density profile. Prior to testing, specimens were conditioned in a climatic chamber at 20 °C and 65 % RH.

Dimensional changes associated with changes in RH were—deviating from EN 318—determined on samples of  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  edge length. Thickness was determined only once in the samples' center, and length changes as the mean of the dimensional changes in plane direction of the whole sample. Relative changes in thickness ( $\delta t_{65, 85}$ ) and length ( $\delta l_{65, 85}$ ) refer to changes of RH with a basic measurement after reaching weight constancy at 20 °C and 65 % RH and a second measurement after reaching weight constancy at 20 °C and 65 % RH. Additionally to changes in thickness and length, relative changes in mass ( $\delta m_{65, 85}$ ) were determined in accordance with  $\delta t_{65, 85}$  and  $\delta l_{65, 85}$ . Finally, the samples were dried at 103 °C and weighed in order to determine the equilibrium moisture content (EMC) at 20 °C and 65 % RH.

Thickness swelling was determined after 2 h and 24 h of water immersion (TS 2 h and TS 24 h).

Parallel to the measurement of the sample's thickness swelling, the increase of mass after water immersion was determined. The mass of absorbed water is expressed as percentage of the initial sample weight and termed as water absorption (WA).

Density profiles were measured on the basis of the radiometric principle applying a modified Itrax Wood Scanner (Cox Analytical Systems, Mölndal, Sweden). Implemented modifications on this device—originally constructed for the execution of dendrochronological studies (annual ring analysis)—were mentioned by Solbrig et al. (2010) referring to Gruchot (2007, personal communication, 2009) and Solbrig (2009). Beginning from the panel's bottom side, the samples were scanned stepwise (step size 0.05 mm) and the density for each scan spot was determined. The obtained data sets (scan spot position and density) were normalized to a consistent panel thickness of 16 mm and the mean density profile for each material

formulation was calculated and plotted (Fig. 6). Additionally, the face layer peak density, average face and core layer density as well as the adjoining position of the face and core laver materials were calculated. As face (core) layer, all those sections were assigned which consist of face (core) layer particles. These sections have been determined on the basis of the average density of the 0.05 mm thick scanned layers (grammage in  $kg/m^2$ ) and the face-to-core layer ratio applied during panel manufacture. For example, at a faceto-core layer ratio of 35/65, the bottom face layer ends at the scan spot position where in sum 17.5 % of the material is detected. The top face layer starts at the scan position where in sum 82.5 % of the material is detected. From this position information, the mean face (core) layer thickness was subsequently calculated. On the basis of the face layer peak density, respectively average face layer density, and the mean core layer density, the density difference between face and core layer were calculated. On the basis of the adjoining position of the face and core layer materials, the mean face and core layer thicknesses were calculated.

#### 2.4 Wood particle characterization

The characterization of face and core layer particles was done on samples at EMC in an air-conditioned environment (both 20  $^{\circ}C/65 \%$  RH) with three-fold determination for each sample.

Particle size analysis was performed applying a horizontal sieve machine (AS 400 Control) from Retsch GmbH (Haan, Germany). Sieving time was 5 min, rotation speed 240 rpm and weight of sample taken 40 g in the case of face layer particles and 46 g in case of core layer particles. Mesh widths of the applied sieves (200 mm diameter) were chosen for face layer particles analysis as

- 0.2 mm
- 0.315 mm
- 0.5 mm
- 0.63 mm
- 0.8 mm
- 1 mm
- 2 mm

#### • 3.15 mm

#### and

- 0.8 mm
- 1 mm
- 1.6 mm
- 2 mm
- 3.15 mm
- 4 mm
- 5 mm
- 8 mm
- 11.2 mm
- 16 mm

for core layer particle analysis.

Face and core layer particles' bulk density were calculated on the basis of the mass of  $2000 \text{ cm}^3$  material.

The moisture content of the particles at EMC (20  $^{\circ}$ C/ 65 % RH) was determined in accordance with EN 322.

#### 2.5 Compression ratio

In order to calculate the compression ratio—meaning the quotient of particle mat thickness and panel thickness—the caul plate's distance was measured prior to hot pressing.

#### 2.6 Statistical analysis

Statistical analysis and graphical representation of the experiments were done applying the analysis tool JMP from SAS, Cary, North Carolina, USA. Histogram plots were arranged using Matlab (MathWorks, Natick, Massachusetts, USA).

#### **3** Results and discussion

#### 3.1 Particle characterization

The histograms of the face (a) and core layer (b) particle size distributions are displayed in Fig. 1. The bulk density (moisture content) was found to be 173 kg/m<sup>3</sup> (10.1 %) in the case of face layer particles and 158 kg/m<sup>3</sup> (10.8 %) for core layer particles.

#### 3.2 Mechanical properties

Bending properties (EN 310) were found to decrease with decreasing panel density. MOE (MOR) decreased from 2443 N/mm<sup>2</sup> (13.6 N/mm<sup>2</sup>) at target density of 650 kg/m<sup>3</sup> to 394 N/mm<sup>2</sup> (2.1 N/mm<sup>2</sup>) at target density of 400 kg/m<sup>3</sup> (mean value over all methods). The decrease of bending



**Fig. 1** Histogram,  $\bar{q}_3(\mathbf{x})$ , of the density distribution and cumulative distribution  $Q_3(\mathbf{x})$  of the analysis of the particle-size distribution of **a** face layer particles and **b** core layer particles by sieve analysis

properties more probably follows a quadratic than a linear relation as suggested by a comparison of the coefficients of determination ( $\mathbb{R}^2$ ). Taking confidence intervals into consideration, no influence of the raw material formulation variation (Methods 1–4) was found on bending properties, as can be seen in Fig. 2.

Internal bond strength (EN 319) was found to decrease with decreasing panel density with 0.49 N/mm<sup>2</sup> at target density of 650 kg/m<sup>3</sup> to 0.15 N/mm<sup>2</sup> (Method 2) respectively 0.22 N/mm<sup>2</sup> (Method 4) at a target density of  $400 \text{ kg/m}^3$ . In the case of Methods 3 and 4, the decrease of IB more probably follows a quadratic than a linear relation as a comparison of the coefficients of determination  $(\mathbf{R}^2)$ suggests. Analyzing Fig. 3, the increase of core layer resin content (Methods 3 and 4) was found to increase IB in comparison to raw material formulations with consistent resin content in the core layer (Methods 1 and 2). The more the resin content in the core layer was increased, the more IB increased. However, with decreasing panel density the benefit of increased resin content decreased. This means that higher resin content can compensate a decreased IB for only a limited range of density reduction. Differences between Method 1 (consistent face-to-core layer ratio) and Method 2 (changed face-to-core layer ratio) were not found.



Fig. 2 Bending properties of the four material formulations (Methods 1–4)



Fig. 3 Internal bond strength of the four material formulations (Methods 1-4)

#### 3.3 Physical properties

Thickness swelling (EN 317) was found to decrease with decreasing panel density. As an explanation it can be assumed that weight reduction was achieved by reducing particle material so that less material is present to swell. For samples made in accordance with Method 1 (simultaneous reduction of face and core layer particles) higher TS were measured than for samples made in accordance with Methods 2, 3 and 4 (Fig. 4, TS 2 h), which implies that especially the core layer material is responsible for TS. The reason may be the lack of hydrophobic agent (paraffin emulsion) used in the core layer. With increasing time of water immersion (24 h) the clearness of this effect gets lost (Fig. 4, TS 24 h). In sum it is noticeable that an increased resin content in the core layer results in decreased TS, in particular at decreased panel densities. A more intensive wetting of the particles with resin (hydrophobization) and



Fig. 4 Thickness swelling and water absorption of the four material formulations (Methods 1–4)



Fig. 5 Relative changes in thickness, length and mass associated with changes in relative humidity of the four material formulations (Methods 1-4)

more intensive prevention of swelling due to higher internal strength (internal bond) may be the reason.

Water absorption (according to EN 317) was found to increase with decreasing panel density. As an explanation a more porous panel structure can be assumed which allows more water to be absorbed in the cavities between the particles. For samples made in accordance with Method 1 (simultaneous reduction of face and core layer particles) higher WA were measured than for samples made in accordance with Methods 2, 3 and 4 (Fig. 4, WA 2 h and WA 24 h). This observation fits well to the explanation given above because less face layer material results in a thicker core layer. Table 2Correlationcoefficients between TS (WA)after immersion in water (2 and24 h) and relative changes inthickness (mass) associated withchanges in RH for Methods 1 to4 respectively across allmethods

	Inside method	Across all			
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	methods
TS 2 h: δt	0.8733	0.9512	0.9878	0.9534	0.9415
TS 24 h: δt	0.9261	0.9748	0.9845	0.9690	0.9529
WA 2 h: ôm	0.8122	-0.0467	-0.5998	-0.8383	0.2160
WA 24 h: δm	0.8347	-0.0155	-0.6117	-0.8320	0.0577

TS thickness swelling, WA water absorption,  $\delta t$  relative thickness change,  $\delta m$  relative mass change



Fig. 6 Density profiles of the four material formulations (Methods 1-4)

Changes in thickness and mass associated with changes in RH (EN 318) were found to follow in principle the results from TS and WA (Fig. 5). This implies in particular relative changes in thickness. With decreasing density the thickness increase decreases. Further on, the graduated effect of the raw material formulation (method) on increase in thickness was the same as that found for TS: samples with high resin content in the core layer show low thickness increase at moisture exposition.

In the case of relative changes in mass associated with changes in RH, an increase of absorbed water (mass increase) at reduced density was found for samples made in accordance with Method 1. However, for samples made in accordance with Method 4 (significantly increased core layer resin content at decreased density) lower mass increases were found at decreased densities. This relationship, as well as the observations in the case of relative thickness increase, supports the assumption that high resin content hydrophobized the wood particles. With the coefficients of determination ( $\mathbb{R}^2$ ) in view, no relationship was found between mass changes associated with changes in RH and panel density, especially for samples made in accordance with Methods 2 and 3. In the case of length changes associated with changes in RH this does apply for all methods. 
 Table 3
 Face and core layer

 thickness, density differences
 and compression ratio of

 weight-decreased particleboards
 barticleboards

Method	Characteristic value	rarget density (kg/m <sup>2</sup> )							
		650	575	500	450	400			
1	Face layer thickness	2.1 mm	2.3 mm	2.4 mm	2.5 mm	2.4 mm			
	Core layer thickness	11.8 mm	11.4 mm	11.3 mm	11.1 mm	11.2 mm			
	Density difference (mean)	316 kg/m <sup>3</sup>	177 kg/m <sup>3</sup>	131 kg/m <sup>3</sup>	86 kg/m <sup>3</sup>	96 kg/m <sup>3</sup>			
	Density difference (peak)	429 kg/m <sup>3</sup>	282 kg/m <sup>3</sup>	192 kg/m <sup>3</sup>	123 kg/m <sup>3</sup>	124 kg/m <sup>3</sup>			
	Compression ratio	3.0	2.7	2.4	2.2	2.0			
2	Face layer thickness	2.1 mm	2.3 mm	2.4 mm	2.4 mm	2.5 mm			
	Core layer thickness	11.8 mm	11.4 mm	11.2 mm	11.2 mm	11.1 mm			
	Density difference (mean)	316 kg/m <sup>3</sup>	180 kg/m <sup>3</sup>	119 kg/m <sup>3</sup>	102 kg/m <sup>3</sup>	79 kg/m <sup>3</sup>			
	Density difference (peak)	429 kg/m <sup>3</sup>	280 kg/m <sup>3</sup>	178 kg/m <sup>3</sup>	151 kg/m <sup>3</sup>	105 kg/m <sup>3</sup>			
	Compression ratio	3.0	2.7	2.3	2.1	1.8			
3	Face layer thickness	2.1 mm	2.3 mm	2.4 mm	2.5 mm	2.6 mm			
	Core layer thickness	11.8 mm	11.5 mm	11.3 mm	10.9 mm	10.8 mm			
	Density difference (mean)	316 kg/m <sup>3</sup>	181 kg/m <sup>3</sup>	134 kg/m <sup>3</sup>	65 kg/m <sup>3</sup>	$40 \text{ kg/m}^3$			
	Density difference (peak)	429 kg/m <sup>3</sup>	289 kg/m <sup>3</sup>	190 kg/m <sup>3</sup>	98 kg/m <sup>3</sup>	$62 \text{ kg/m}^3$			
	Compression ratio	3.0	2.4	2.2	1.9	1.8			
4	Face layer thickness	2.1 mm	2.4 mm	2.4 mm	2.6 mm	2.7 mm			
	Core layer thickness	11.8 mm	11.2 mm	11.2 mm	10.9 mm	10.7 mm			
	Density difference (mean)	316 kg/m <sup>3</sup>	125 kg/m <sup>3</sup>	105 kg/m <sup>3</sup>	59 kg/m <sup>3</sup>	$27 \text{ kg/m}^3$			
	Density difference (peak)	429 kg/m <sup>3</sup>	205 kg/m <sup>3</sup>	154 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/m <sup>3</sup>	49 kg/m <sup>3</sup>			
	Compression ratio	3.0	2.7	2.3	1.9	1.8			

A direct relationship (correlation) between results from TS after immersion in water (2 and 24 h) and changes in thickness associated with changes in RH was found, as can be understood on the basis of correlation coefficients displayed in Table 2. For both, within each material formulation as well as across all methods, a significant positive correlation between TS and thickness increase was found. This result confirms the assumption that the measurement of changes in thickness associated with changes in RH does not provide a gain in knowledge compared to the determination of TS after immersion in water.

In the case of WA and mass increase, significant relations (high correlation coefficients) can be found within each material formulation for some value pairs. However, positive and negative correlation coefficients were found. In consequence, conclusions cannot be drawn from the one to the other measurement.

For all material formulations, a significant change of the density distribution over the panels cross section was found with decreasing density. This can be understood when looking at Fig. 6. Those density peaks found at high panel densities (maximal face layer density) flatten with decreasing panel density. In the case of panels with a density of 400 kg/m<sup>3</sup>, the maximal face layer density is close to mean core layer density. For samples with high resin content in the core layer (Methods 3 and 4) a nearly homogeneous density profile was found.

Changes in density profiles (Fig. 6) can also be traced by characteristic values (density difference) as displayed in Table 3. With decreasing panel density the difference between face and mean core layer density becomes smaller. Clear differences between raw material formulations can be seen for Method 4 and Method 3 at lower densities.

The constant (Method 1), respectively varied (Methods 2, 3 and 4) face and core layer thickness with decreasing density, reflects the different face-to-core layer ratio applied. The application of a high face-to-core layer ratio leads to thicker face layers, while simultaneous reduction of face and core layer material (Method 1) leads to constant face and core layer thicknesses. Regardless of these differences, the density profile developed for all samples in nearly the same manner. This means, that a pronounced density profile cannot be realized by changes in the ratio of face and core layer material. As it can be concluded from the overall decreasing compression ratio (Table 3) too, modifications need to be made on the particle mat structure in order to achieve high-density face layers with simultaneously reduced panel density. Towards this goal, the compression resistance of the face layer material needs to be reduced and the compression resistance of the core layer material increased.

The mean EMC at 20 °C and 65 % RH were found to be 9.8 % (standard deviation  $\pm 0.2$  %) and at 20 °C and 85 % RH 16.0 % (standard deviation  $\pm 0.4$  %).

#### 4 Conclusion

Before considering particle geometry as a variable in the development of lightweight PB in order to increase the compression resistance of the core layer particles, the influence of changes occurring in the face-to-core layer ratio and core layer resin content on panel properties due to reduced material use was investigated in this study.

It was found that the assembling of material composition influences mainly the internal bond strength and physical properties. Bending properties were not found to be affected. While increased resin contents in the core layer (Methods 3 and 4) lead to improved IB, physical properties worsen if face and core layer (Method 1) were reduced simultaneously. This leads to the conclusion that the application of Method 2 (reduction of core layer material only) causes minimal unintended side effects and seems to be an adequate basis for further experiments. In addition to unintended side effects, Method 2 seems to be advantageous because requirements with regard to mechanical properties (e.g., EN 312, boards for interior fitments for use in dry conditions-Type P2) and surface quality (coatability) usually have to be met by lightweight PBs as well. Thus, a re-engineering of the panel's core layer (decrease of density, increase of compression resistance) is more likely, because surface layers can be kept unchanged.

Based on the results obtained, the development of lightweight PB on the basis of adjusted particle geometry (shape and dimension) in the core layer can be conducted, because the effect of changes in the face-to-core layer ratio and core layer resin content on panel properties are now known.

Acknowledgments The authors thank the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, Germany, for their financial support and all those who were engaged in the experimental realization, namely Mrs. Dörte Bielenberg, Mrs. Stefanie Warsow and Mr. Hannes Wagner. The Company Kronopol Sp z o.o., namely Prof. Dr. Joachim Hasch and Mr. Maik Hirschberg, is gratefully acknowledged for providing test materials and technological advice.

#### References

- Balducci F, Harper C, Meinlschmidt P, Dix B, Sanasi A (2008) Development of innovative particleboard panels. Drvna industrija 59(3):131–136
- Berggren P (2014) Industrialisierung moderner Leichtbauwerkstoffe für den Möbelbau. (Industrialization of modern lightweight construction materials for the building of furniture) (In German)]. Leichtbau-Symposium 2014, 4. December 2014, Herford, Germany. In: Benthien JT (2014) Mega-Trend, Zukunftsmusik oder Sackgasse? [Mega trend, future music or dead end?] (In German) Holz-Zentralblatt 2014(3):58–59
- EPF (2013) Annual Report 2013–2014. European Panel Federation, 19 June 2014, Bruges, Belgium
- Gruchot (2009) In-situ-Untersuchungen des Rohdichteprofiles von Holzwerkstoffen am Beispiel von MDF [In-situ studies of the density profile of wood-based panels based on the example of MDF] (In German). Dissertation, Hamburg University, Hamburg, Germany
- Michanickl A (2004) Light wood based panels—state of the art trend. In: 4th European wood-based panel symposium. Hannover, Germany. 15–17 Sept 2004. European Panel Federation
- Plath E, Schnitzler E (1974) Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten (The density profile, a criterion for evaluating particleboard) (In German) Holz Roh-Werkst 32:443–449
- Solbrig (2009) Optimierung und Evaluierung eines radiometrischen Dichtemessplatzes am Beispiel des Itrax Woodscanners [Optimization and evaluation of an radiometric density measuring station based on the example of the Itrax Woodscanner] (In German). Master thesis Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Lemgo, Germany
- Solbrig K, Frühwald K, Gruchot M, Ressel JB (2010) Rohdichteprofilbestimmung bei Holzwerkstoffen—"Itrax Woodscanner" als radiometrischer Labor-Dichtemessplatz für Holzwerkstoffe und Sonderanwendungen [Density profile determination on woodbased panels—"Itrax Woodscanner" as an radiometric laboratory density measuring station for wood-based panels and special applications] (In German). Holz-Zentralblatt 36:895–896
- Thoemen H (2008) Lightweight panels for the European furniture industry: Some recent developments. COST Action 49 processes and performance of wood-based panels, lightweight wood-based composites, production, properties and usage. Bled, Slovenia, 23–25 June 2008
- WPIF (2014) Panel Guide Version 4. Wood Panel Industries Federation ISBN 978-1-909594-21-0

Publikation II

#### ORIGINAL



## Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing

Jan T. Benthien<sup>1</sup> · Martin Ohlmeyer<sup>1</sup> · Matthias Schneider<sup>2</sup> · Thomas Stehle<sup>2</sup>

Received: 29 July 2016 / Published online: 30 November 2017 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2017

#### Abstract

The price for industrial wood and, thus, particles for the manufacture of particleboard has been rising in the past and will be a topic of current interest in the future as economic growth is targeted at limited resources. One of the strategies to overcome this development is to reduce the amount of wood used for panel production. However, a simple reduction in the amount of wood used for panel manufacture leads to panels of lower density and, consequently, reduced properties. One approach to solving this problem is to re-engineer the particle mat structure to improve the panels' density profile and, thus, meet required panel properties and at the same time lower board densities. As the particles' compressibility is one of the main influencing parameters for density profile formation, it is the intention of this study to use a previously developed measurement method to give compression resistances of particles of various shapes and dimensions. It was found that the bulk density alone is not decisive for the particles' compression resistance. The compression resistance of large-sized particles was found to be higher than that derived from wood substance compression. The compression resistance of large-sized particles was found to be higher than that of small-sized particles. It was concluded that a targeted combination of face and core layer particles improves the panels' density profile.

#### 1 Introduction

With an annual production of about 28.4 million  $m^3$  in 2013, particleboard is the most important type of wood-based panel in Europe and, with a share of 68% of the overall sales, used mainly in the furniture sector (EPF 2013).

Particleboard is made of glued wood particles, which are first formed to a particle mat and subsequently pressed and cured in a hot press to panels. More than 50% of the total expenses for particleboard manufacture account for wood material and particle manufacture (Aßmann 2015). During the past years, competition for wood has been increasing and, thus, the cost of particles. Current strategies to overcome this are *inter alia* to ensure low purchasing prices for wood (by e.g., long-term contracts with forest owners or

Jan T. Benthien jan.benthien@thuenen.de forest estates), and to increase its use efficiency (make more out of less) with rationalization measures, the increase of plant productivity and the substitution of fresh wood with waste or used wood. All of these practices have almost been optimized. Efficient use means in this context a reduction of the amount of wood used for panel manufacture. However, a simple reduction of wood usage for panel manufacture leads to panels of lower density and, consequently, reduced properties (Benthien and Ohlmeyer 2017). Thus, in the case of wood-reduced panels, re-engineering of the product is needed to meet property requirements.

The typical cross-section of particleboard is characterized by a layered set up, with highly compacted face layers, composed of finer particles, and a core layer of coarse particles and reduced density. A high surface layer density is required in order to meet coating requirements, as well as to absorb tension and compression forces at bending application. The core layer can be of lower density, as comparatively low forces (shear stress in plane direction and tensile stress perpendicular to the panel's plane direction) have to be resisted.

The density profile of particleboard is formed during hot pressing as an interaction among process parameters (press-closing time, press cycle including heat, pressure and

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstraße 91c, 21031 Hamburg, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Stuttgart University, Institute of Machine Tools (IfW), Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart, Germany

duration) on the one hand, and "particle mat structure" on the other hand. Plath and Schnitzler (1974) defined "particle mat structure" as the distribution of the material on the face and core layer, wood species, particle shape and dimension, resin content in face and core layer and the moisture content in the face and core layer. The effects of these influencing parameters on the formation of the particleboard density profile were investigated by Hänsel et al. (1988). Mihailova and Tritchkov (2009) tried to transfer the results into a model for the calculation of the maximum vertical density difference.

Press process, distribution of the material on the face and core layer, resin and moisture content in the face and core layer are optimized to a great extent, while particle characteristics (shape and dimension) were not in the focus of optimization in recent years. Low chipping costs were considered to be of major interest as wood availability was no limiting factor. Thus, particle shape and dimension seem to be promising parameters in the aim to compensate decreasing panel properties in the course of wood reductions. Only small adjustments in the process technology (wood chip manufacture) have to be performed to change mat performance.

In principal the same load is applied to each cross-sectional position of the mat. Thus, the non-uniform deformation of the particles along the thickness direction of the board is due to moisture and heat-induced changes of the particle rheology during press cycle. In addition to the moisture and heat-induced changed compactness, the compression resistance of particles may contribute to the density profile formation. Consequently, the application of lowcompression resistance particles as a face layer material and high compression resistance particle in the core layer may improve the density profile formation.

This study aims to eliminate the need for test panel manufacture to evaluate the potential of novel particle shapes in the development of wood-reduced particleboard manufacture. For this purpose, a method for measuring the compression resistance of wood particles was presented and applied to various industrially-made conventional wood chips, cutter block-flaked wood chips, and wood particles of innovative geometry.

#### 2 Materials and methods

#### 2.1 Wood particles from a conventional particleboard plant

Three different types of face layer (FL) and core layer (CL) wood particles each were obtained from industrial particleboard plants (A, B, C). With respect to plant encoding, the particles are named FL A, FL B, and FL C in the case of face layer particles and CL A, CL B, and CL C in the

case of core layer particles. An optical impression of the particles can be obtained in Fig. 1. Manufacturer A and B use green harvested timber as raw material, while manufacturer C obviously uses a certain degree of waste wood.

#### 2.2 Wood particles of innovative geometry

In addition to conventionally manufactured particles, five particle types of innovative geometry (Inno) were investigated. An optical impression of the particles can be obtained in Fig. 2. The particle Inno I is a core layer-like wood particle obtained as a by-product from an industrial sawmill profiling line. A specific milling tool from Leuco Ledermann GmbH & Co. KG (Horb am Neckar, Germany) was used for round wood profiling. This tool shapes the particle morphology and, thus, enhances the attractiveness of the by-product for the wood industry. The particle Inno II was manufactured by Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG (Zweibrücken, Germany) with the intention of obtaining a particle of cubic shape. The particles Inno III, Inno IV, and Inno V were manufactured by Stuttgart University, Institute of Machine Tools (Stuttgart, Germany). A low particle bulk density was targeted in the manufacture of Inno III and Inno IV. The particle Inno V was manufactured applying a wobbler saw with the intention of obtaining S-shaped particles, as described by Plath and Schnitzler (1974).

#### 2.3 Fractions of wood particles manufactured applying a cutter block flaker

A third series of particles were fractions of particles manufactured by Kronopol Sp z o.o. (Zary, Poland) applying a Hombak cutter block flaker (Hombak Maschinen- und Anlagenbau GmbH, Bad Kreuznach, Germany). Particles are named FL Hom, CL Hom, Hom 125–315, Hom 315–500, Hom > 500. An optical impression of the particles can be obtained in Fig. 2.

The Hombak particles were dried at ambient conditions (20 °C and 65% relative humidity) and afterwards fractionated at the Fraunhofer Institute for Wood Research (Braunschweig, Germany). Mass fractions of 4.2% (<0.6 mm), 9.0% (0.6–1.25 mm), 24.0% (1.25–3.15 mm), 23.2% (3.15-5 mm), and 39.6% (>5 mm) were received. Two particle mixtures were made and used as face layer particle (FL Hom) and core layer particle (CL Hom). FL Hom were made of 31.6% particles from the first fraction (<0.6 mm) and 68.4% particles from the second fraction (0.6–1.25 mm). CL Hom were made of 27.7% particles from the third fraction, 26.7% particles from the fourth fraction, and 45.6% particles of the fifth fraction.



Fig. 1 Face layer (FL) and core layer (CL) wood particles from commercial particleboard plants (A...C)

**Fig. 2** Wood particles of innovative geometry (Inno I...V) and those of cutter block flaker manufacture (FL Hom, CL Hom, Hom 125–315, Hom 315–500, Hom > 500)



#### 2.4 Compression resistance

Compression resistance measurement was carried out applying a universal testing machine (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Germany) equipped with a metallic beaker (press cylinder) on the bottom side of the test area and a plunger fixed below the load cell at the crosshead (Fig. 3). The diameter of plunger and press cylinder were 100 mm, which means a base area of 7,854 mm<sup>2</sup> for testing. The height of the press cylinder was 100 mm, which results in a maximal volume of approximately 0.8 litres (785,398 mm<sup>3</sup>). During particle compression (plunger inserts into the press cylinder) a maximal specific pressure of 31.8 N/mm<sup>2</sup> was applied. This limit



**Fig. 3** Experimental setup: universal testing machine equipped with a plunger (diameter 100 mm) fixed below the load cell at the crosshead and a metallic beaker (height 100 mm) on the bottom side of the test area

was set in order to stay within the measuring range of the load cell. The press cylinder volume and the particles bulk density limited the weighted mass of particles to be tested and can be calculated following Eq. 1.

$$\mathbf{m} = \rho_{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{r}^2 \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{h} \tag{1}$$

where m = mass (kg),  $r_b$  = bulk density (kg/m<sup>3</sup>), r = press cylinder radius, here 0.05 m, h = press cylinder height, here 0.1 m.

Force and displacement were recorded with a sampling rate of 0.4 Hz. The specific press pressure was calculated based on the force applied and the plunger base area. The specific press pressure corresponds to the compression resistance of the particles respectively the particle mat investigated, as the pressure provided by the test machine and counter pressure of the particle mat are equivalent to each other. The density of the compacted particle mat was calculated considering the weighed mass, plunger base area and distance between press cylinder bottom and plunger. The compression process was stopped at a density of approximately 1000 kg/m<sup>3</sup>. In respect to weighed mass, thus, the minimal distance between plunger and the bottom of the press cylinder was 1.3, 3.3, 6.4, or 12.7 mm. On the basis of this dataset, the compression resistance can be visualized as a pressure-density-diagram with regard to mat density.

Samples were conditioned at 20  $^{\circ}$ C and 65% relative humidity prior to testing.

#### 2.5 Bulk density

Particles' bulk density was calculated on the basis of the mass of 2000 cm<sup>3</sup> material formed into a beaker glass with a bottom diameter of 11.5 cm and an opening diameter of 14 cm.

#### 2.6 Experimental setup

In a first test series, the influence of compression velocity (15, 30, and 60 mm/min at a given sample mass of 100 g) and sample mass (10, 25, 50, and 100 g at a given compression velocity of 30 mm/min) on the compression resistance of particle mats of the face layer particle FL A and the core layer particle CL A were investigated. A second test series compared the compression resistance of particle mats of different particle types for the use as face layer (FL A...C, and FL Hom) and core layer material (CL A...C and Inno I...V). The compression velocity was consistent at 30 mm/ min. In the case of the face layer particles 100 g sample material were weighed in. The compression resistance of particle mats of particles for the use as core layer material was compared at sample masses of 10, 25, and 100 g. In a third test series, the compression resistance of differently sized core layer particles (fractions and mixtures of particles manufactured applying a Hombak cutter block flaker) was compared at a given compression velocity of 30 mm/min and sample mass of 50 g. Sample mass has to be chosen in respect to particle bulk density and volume of the press cylinder. In order to compare the compression resistance of particles with different bulk densities, the particles FL A and CL A were tested at 10, 25, 50, and 100 g sample mass to serve as a reference.

#### **3** Results and Discussion

#### 3.1 Influence of compression velocity and weighted sample mass on compression resistance

The influence of compression velocity and weighted sample mass on compression resistance was tested applying the face layer particle FL A and core layer particle CL A. The variation of compression velocity was 15, 30, and 60 mm/min, and that of weighted sample mass 10, 25, 50, and 100 g. This procedure was adopted to gain an understanding of the impact of the adjustable experiment variables on the measurement results. Further on, in this way the particles FL A and CL A could serve as a reference when the investigation of low bulk density particles requires a lower mass of

sample taken because of the limited volume of the compression cylinder.

It can be seen from Fig. 4, that no influence of compression velocity was found on the compression resistance. Varying the mass of sample taken, obviously significant differences were found in the case of the nominal compression resistance and the manner of compression resistance increased with increasing compression. As a first result, this means that compression resistances can be only compared at equal masses of particles investigated. This finding is of interest when particles of lower bulk density are to be tested.

Principal particle mat compression behaviours seem to be derivable from differences in the manner in which compression resistance increases. In the case of a thin particle mat (10 g of material), the increase of compression resistance with increasing particle compaction was found to be proportional. In the case of thicker particle mats (e.g., 100 g of material), the compression resistance increased disproportionally. It can be concluded from the proportional increase that in particular a compaction of the wood substance takes place. At higher amounts of sample taken, the compression resistance is almost on the level of low mat densities, although much more (up to the ten-fold in the case of 100 g of material taken) wood has to be compacted. At higher mat densities the compression resistance shows a disproportionately strong increase. One can draw the conclusion



**Fig. 4** Influence of compression velocity (**a** face layer particles, **c** core layer particles) at a consistent sample mass of 100 g and weighted sample mass (**b** face layer particles, **d** core layer particles) at a consistent compression velocity of 30 mm/min on compression resistance

that a compression of the mat structure takes place (shape change of the particles) first, and later, at higher densities, the compression of the wood substance starts. The compression resistance derived from particle shape change is lower than that derived from wood substance compression.

This fits well with findings from Sosin (1974) who investigated the elasticity and compressibility of particle mats for particleboard manufacture. He concluded from his results that particles get closer together at low compression resistance in the beginning of compression, while in the course of the compression, compression resistance increases. This increase was attributed to different causes and was sorted as follows:

- 1. particles get closer together
- 2. deformation of the particles
- 3. shift of the particles relative to each other
- 4. compression of the wood substance at the contact points between the particles

# 3.2 Compression resistance of different particle types

The compression resistances of particle mats of different particle types for the use as face layer (FL A...C, and FL

943

Hom) and core layer material (CL A...C and Inno I...V) are displayed in Fig. 5. The data from face layer particle measurement are visualized in Fig. 5a, and those of core layer particle measurement with regard to bulk density in Fig. 5c (100 g sample material), Fig. 5b (10 g sample material), and Fig. 5d (25 g sample material).

It can be seen from Fig. 5, that different particles have different compression resistances throughout the whole process of compression or at different density levels. For example, the compression resistance of the core layer particle CL A is higher than that of the particle Inno V throughout the whole process of compression. In contrast, the compression resistance of particles made by Manufacturer C are lower at low densities and higher at higher densities than that of the other particles investigated. As usually required particleboard properties are reached by the manufacture of panels with pronounced density profile, the combination of a face layer particle with a comparable low compression resistance at higher densities up to 1000 kg/m<sup>3</sup> and a core layer particle with a comparably high compression resistance at densities up to 500 kg/m<sup>3</sup> for panel manufacture would be beneficial. Such a combination, which presumably leads to a panel of more pronounced density profile, would be reached choosing the face layer particle FL C and the core layer particle Inno I.



Fig. 5 Compression resistance of particle mats of different particle types for the use as face layer ( $\mathbf{a}$ ) and core layer in respect to bulk density ( $\mathbf{c}$  100 g particles,  $\mathbf{b}$  10 g sample material,  $\mathbf{d}$  25 g sample material)

Lower compression resistances were found in the case of low bulk density particles (Inno I...V), than for the reference particle CL A. This finding is in contrast to the expectations, as low-bulk density particles were assumed to provide high compression resistances. However, as the particles bulk density is determined by the particle geometry and wood density, this finding shows that the wood density is causal for higher compression resistances. Voluminous and, thus, low bulk density do not provide higher compression resistances. This can also be seen in Table 1 and fits well with the mechanics of compaction concluded from Sosin (1974) above.

A hint at the limited correlation between particle bulk density and compressibility (deformability at given pressing pressure) can be found in Grigoriou (1981), who noted particles from Weymouth pine (*Pinus strobus*) to be of lower compressibility than is to be expected from its bulk density. Aside from the particle size distribution, particle dimensions, bending strength of the individual particle and the orientation of the particles, Grigoriou assumed the

**Table 1** Bulk densities of the investigated particles (FL A...C = face layer particles from conventional particleboard plant, CL A...C = core layer particles from conventional particleboard plant, Inno I...V = core layer particles of innovate geometry, FL/CL Hom = face/core layer particles made by applying a Hombak cutter block flaker, Hom all, 125–315, 315–500, > 500 = fractions of particles made by applying a Hombak cutter block flaker)

Particle	Bulk density	Compression resistance (N/mm <sup>2</sup> )					
	(kg/m³)	10 g	25 g	50 g	100 g		
FL A	173	4.8	8.8	13.0	16.4		
FL B	209	_	_	_	16.8		
FL C	243	_	_	-	16.9		
FL Hom	139	_	_	_	15.3		
CL A	158	2.2	2.7	2.9	3.1		
CL B	153	_	_	_	3.1		
CL C	176	_	_	_	2.6		
CL Hom	91	_	_	3.1			
Inno I	128	_	-	-	3.4		
Inno II	213	_	-	_	3.2		
Inno III	14	1.5	2.1	_	_		
Inno IV	23	1.8	2.1	_	_		
Inno V	53	_		_	-		
Hom all	96	_	-	2.8	_		
Hom 125-315	123	_	_	2.8	_		
Hom 315-500	100	_	_	2.9	_		
Hom >500	77	-	_	3.2	-		

Compression resistance is given for all face layer particles (indicated by FL in the designation) at a density of  $1000 \text{ kg/m}^3$  and for all other particles at a density of 500 kg/m3. Compression speed was the same for all (30 mm/min), while weighted mass was varied. (10, 25, 50, and 100 g)

compression resistance of the individual particle (wood density) to be reasonable for the differences found.

Plath and Schnitzler (1974) attributed a high compression resistance to particles mats of thick and irregularly shaped particles, because the shorter particles orientate diagonally or vertically. Further on, S-shaped particles ("spindle-shaped") from wobble saws were mentioned to be of high compression resistance due to their high degree of mutually felting.

#### 3.3 Relationship between particle size and compression resistance

The relationship between differently sized core layer particles and compression resistance was investigated on fractions and mixtures of particles manufactured applying a Hombak cutter block flaker. The measuring data are displayed in Fig. 6, obviously showing that compression resistance increased significantly with increasing particle size. The increase of compression resistance was found to be much more pronounced for an increase of particle size from the fraction Hom 315–500 to Hom > 500 than for the increase from the fraction Hom 125–315 to Hom 315–500. This may be due to the fact that the fraction Hom > 500 is not limited to enlargement.

The finding of increased compression resistance with increasing particle size supports the assumption of higher compression resistance in the case of wood compression compared to that derived from particle shape change. In the case of large particles, a direct wood compression is more likely than shape changes during compression, and in consequence the compression resistance is higher.



Fig. 6 Compression resistance of different-sized core layer particles at consistent mass of sample taken (50 g) and compression velocity (30 mm/min)

#### 4 Conclusion

Against the backdrop of wood-reduced particleboard development and the intention to eliminate the need for test panel manufacture to evaluate the potential of novel particle shapes for this purpose, a method to determine the wood particle compression resistance was presented and applied to various industrially-made conventional wood chips, cutter block-flaked wood chips, and wood particles of innovative geometry. The investigation of compression velocity and weighted sample mass showed that a comparison of compression resistances has to be done at equal particle masses as different masses of the same particles lead to different compression resistances. It was concluded from this test series that the compression resistance derived from particle shape change is lower than that derived from wood substance compression. The investigation of differently sized particles and particles of low bulk density supports this conclusion as compression resistance was found to increase with increasing particle size but not found to increase in the case of low bulk densities. This means at least that low bulk density particles are just beneficial for the manufacture of lightweight particleboards if their low density is caused by the low density of the wood substance and not by the shape of the particles.

A further finding was that particles of various origins (Manufacturer A...C) and innovative geometries (Inno I and II) showed different compression resistances. From this finding, the combination of a low compression resistant face layer particle with a high compression resistance core layer was proposed to manufacture panels with a more significant density profile at otherwise unchanged press parameters. A strongly pronounced density profile is assumed to be a key factor, targeting the manufacture of a less material-intensive core layer and at the same time load-bearing face layers.

Particle shape may just have a positive impact on the manufacture of wood-reduced particleboards if the amount of direct wood compaction is increased for this reason. No positive impact can be expected in the case of a simple increase of bulk density, and, thus, a pure increase of particle shape deformation. Factors like particle orientation as an effect of particle size and shape distribution, and the degree of mutual felting as a reason for high compression resistance were not investigated.

Acknowledgements The authors thank the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, Germany, for its financial support, and all those persons who were engaged in the experimental realization, namely Mrs. Sabrina Heldner, Mrs. Dörte Bielenberg and Mr. Hannes Wagner (all Thünen Institute of Wood Research). The firm Kronopol Sp z o.o. (Zary, Poland), namely Prof. Dr. Joachim Hasch and Mr. Maik Hirschberg, the firm Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, namely Dr. Helmut Roll, the firm Dold Holzwerke GmbH (Buchenbach, Germany), and Dr. Martin Dressler (Leuco) are gratefully acknowledged for providing test materials.

#### References

- Aßmann J (2015) Kostendruck macht erfinderisch [Cost pressure is the mother of invention]. In: Proc of 11th Holzwerkstoffkolloquium, 10–12. Dezember 2015. Dresden, Germany
- Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. Eur J Wood Prod 75(1):55–62
- EPF-European Panel Federation (2013) Annual Report 2013–2014. Bruges, Belgium
- Grigoriou A (1981) Die Eigenschaften von Feinspänen aus sieben verschiedenen Holzarten [The properties of fine wood particles made of seven different wood species]. Holzforsch Holzverw 33(1):1–5
- Hänsel A, Niemz P, Brade F (1988) Untersuchungen zur Bildung eines Modells für das Rohdichteprofil im Querschnitt dreischichtiger Spanplatten [Investigations to generate a model for density profiles in the cross-section of particleboards]. Holz Roh Werkst 46:125–132
- Mihailova J, Tritchkov N (2009) Theoretical model for determination of the maximum difference in particleboards vertical density. In: Proc of COST Action E49, Processes and performance of woodbased panels - adding value through physical functionality, 28.-29. April 2009. Istanbul, Turkey
- Plath E, Schnitzler E (1974) Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten [The density profile, a criterion for evaluating particleboard]. Holz Roh Werkst 32:443–449
- Sosin MJ (1974) Untersuchung der Elastizität und Verformbarkeit der Spanvliese bei der Spanplattenherstellung [Investigation of elasticity and deformability of the particle mats in particleboard manufacture]. Holztechnologie 15(1):45–48

Publikation III

**BRIEF ORIGINAL** 



# Enhancement of low-density particleboard properties by core layer particle orientation

Jan T. Benthien<sup>1</sup> · Martin Ohlmeyer<sup>1</sup>

Received: 8 March 2017 / Published online: 22 December 2017 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2017

#### Abstract

Three layer particleboards of 500 and 650 kg/m<sup>3</sup> target density were made by spreading the core layer wood particles between upright positioned caul plates with the intention of partial vertical orientation. This procedure was assumed to increase the core layer compression resistance and, thus, counteract decreased panel properties in lightweight particleboard manufacture. While internal bond strength and thickness swelling were significantly improved, bending properties were on the same level as those of the references with conventional particle orientation. Density profiles were found to be just slightly more pronounced. The lack of improvements was explained by the changed structural set-up and, thus, lacking of core layer support.

#### 1 Introduction

In the past years, competition for wood and wood co-products has increased and, thus, also expenses for particles used for wood-based panel manufacture. To counteract this development, efforts are made to increase the material efficiency of the wood (Berggren 2014), as other rationalization measures to keep or increase plant productivity have almost been optimized. In this context, material efficiency means a reduction in the amount of wood used for panel manufacture. However, a simple reduction of the amount of wood for panel manufacture leads to panels of lower density and, consequently, lower properties (Dunky and Niemz 2002).

The comparably lower particle compression in the manufacture of density-decreased particleboard (PB) and, thus, the comparably fewer and smaller load-bearing adhesive connections between the particles, have to be assumed as the reason for the reduction of properties. While panel properties can be compensated for up to a certain degree by an increase in the adhesive content, in particular sufficient bending properties require a pronounced density profile with high-density face layers. In the conventional PB process, high-compressed face layers are obtained as a result of the wood loading and the applied pressing program (short closing time). Here, the heat- and moisture-induced plasticized

Jan T. Benthien jan.benthien@thuenen.de face layer particles are compressed against the still cold and highly wood loaded core layer of high compression resistance. With a simple reduction of the amount of wood for panel manufacture, the core layer particles are just less compacted and provide a lower compression resistance resulting in reduced face layer density and strength.

Following the suggestions from Plath and Schnitzler (1974) on increased compression resistance due to oblique and upright oriented particles in the mat (referring to the patent DBP 967328 from Fahrni 1942), it is the intention of the present study to investigate the potential of such orientated particles in the core layer to counteract decreased panel properties in wood-reduced PB manufacture. For this purpose, panels with core layer particles spread between upright positioned caul plates were made, their properties determined and compared to those of panels with conventional particle orientation.

#### 2 Materials and methods

#### 2.1 Panel manufacturing

The material used for panel manufacture (wood particles, adhesive, hardener and additives), the recipe for face and core layer particle preparation, the method of reducing the amount of wood particles, and the applied pressing procedure were equal to that of reference sample manufacture as described by Benthien and Ohlmeyer (2017). From the four described methods for reducing the amount

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstr. 91c, 21031 Hamburg, Germany

of wood particles, "Method 2" was applied. This means that the core layer resin content was kept consistent at 8%, while the face-to-core layer ratio was reduced from 35/65 for panels with a target density of  $650 \text{ kg/m}^3$  to 46/54 for panels with a target density of  $500 \text{ kg/m}^3$ .

In contrast to reference sample manufacture, the formation of the particle mats with intended vertical particle orientation in the core layer was performed as follows:

1. The core layer particles were spread between two vertically positioned caul plates, which are kept at a distance from each other via compressible spacers (see Fig. 1a).





Fig. 1 Schematic drawing of the spreading procedure applied to achieve vertically oriented core layer particles (a) and visual edge appearance and particle orientation of "Cross" and "Length" cut

bending samples (**b**). Results from panel testing as well those of reference samples, with bending properties in (**c**), internal bond strength in (**d**), thickness swelling in (**e**), and raw density profile in (**f**)

- 2. After core layer spreading, the caul plates with the mat between them were positioned horizontally, the upper caul plate was removed, and the first face layer spread.
- 3. The first face layer was covered with siliconized paper, the caul plate laid upon it, the so-fixed mat was turned 180-degrees, the now upper caul plate removed and the second face layer spread.

Core layer mat formation can be understood as somehow similar to the spreading process of extruded particleboard manufacture. The particles come to rest loosely piled up in the spreading form, oriented lengthwise coincidental in the area perpendicular to fall direction. Due to this structural set-up and putting the core layer mat flat down to add the face layers, two panel directions occur and have to be considered in the course of bending properties. These two panel directions will be called "Length" and "Cross" in the following (see Fig. 1b). The edge in Length-direction of the pressed panel is characterized by longitudinally cut particles with lengthwise, oblique, and upright oriented particles. The edge in Cross-direction is characterized by crosswise cut particles with a quite loose core layer structure and partially perpendicular to the plane direction orientated particles. In contrast to extruded PB, where the mat is compressed in the direction of the falling particles, the mat compression here is done after turning the core, so that particle compression takes place in the grain direction, or rather, more often in a certain angle to that.

The spacers were cut from polyurethane foam panels in a thickness that allows the volume between the caul plates to be spread with the amount of particles calculated from the face-to-core layer ratio and panel size.

In contrast to reference sample manufacture, the panel size was chosen to be  $800 \times 500 \text{ mm}^2$  in order to receive a sufficient number of samples in Length and Cross direction for bending tests, but keeping the particle mass constant like that of reference sample manufacture.

#### 2.2 Experimental setup

A total of six experimental particleboards with adapted core layer particle orientation were tested, while three panels were made for each target density (500 and 650 kg/m<sup>3</sup>). Test results obtained from a previously published study (Benthien and Ohlmeyer 2017) with conventional core layer particle orientation and varied target density (400, 450, 500, 575, and 650 kg/m<sup>3</sup>) served as reference.

#### 2.3 Sample preparation and testing procedure

Prior to sample cutting, test panels were trimmed to a size of approximately  $600 \times 370 \text{ mm}^2$ . The number of test specimens for each target density was 18 (nine for each panel

direction): for modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) according to EN 310, 24 for internal bond strength (IB) according to EN 319, 15 for thickness swelling (TS) according to EN 317, and six (three for each panel direction) for measuring the density profile. Prior to testing, specimens were conditioned in a climatic chamber at 20 °C and 65% relative humidity.

Thickness swelling was determined after 2 and 24 h of water immersion (TS 2 h and TS 24 h).

Density profiles were measured as described by Benthien and Ohlmeyer (2017).

#### 2.4 Data treatment and statistical analysis

As target densities were poorly achieved, a linear interpolation of the reference data was done in order to statistically compare the panel properties at an almost constant density level of approximately 455 and 600 kg/m<sup>3</sup>. Data normalization was done on the basis of the commonly assumed linear interrelation between property and density. In the case of bending data, samples of 450 and 500 kg/m<sup>3</sup> and those of 575 and 650 kg/m<sup>3</sup> target density were used for straight-line equation calculation and afterwards data normalization to 455 and 600 kg/m<sup>3</sup> each. IB and TS data were normalized on the basis of the slope of trend line for all reference data (400...650 kg/m<sup>3</sup>).

Statistical analysis was done applying the analysis tool JMP from SAS, Cary, North Carolina, USA. The Tukey-test was applied at a significance level of  $\alpha = 0.05$  for mean value comparison.

#### **3** Results and discussion

The results from panel testing, the reference samples' properties, as well as the normalized data are displayed in Fig. 1, with bending properties in (c), IB in (d), and TS in (e). Raw density profiles are shown in Fig. 1 f. Table 1 lists the results from panel testing (PB with adapted core layer particle orientation) and the normalized references (conventional particle orientation) for comparison on consistent density levels ("High" = ~ 600 kg/m<sup>3</sup>, "Low" = ~ 455 kg/m<sup>3</sup>) and statistical analysis. Although normalization has to be handled with care, it seems to be justifiable here as the reference data covers a wide range of density levels, which proves the assumed relationship between density and property.

It can be seen from Fig. 1c that bending properties of panels with adapted particle orientation are in the range of panels with conventionally oriented particles. The statistical analysis (first pairs of data being compared; I in Table 1) shows that the properties of samples with adapted particle orientation and panel Cross-direction are mostly minor to those of reference samples. The bending properties of those

Density Core layer		Panel direction	Bending properties							IB (I	IB (N/mm <sup>2</sup> )		Thickness swelling		
level (kg/ particle orien- m <sup>3</sup> ) tation			MOE (N/mm <sup>2</sup> )		MOR (N/mm <sup>2</sup> )					2 h (%)	TS 24 h (%)				
			n		Ι	Π		Ι	Π	n		n			
≈600	Adapted	Cross	9	1745 (158)	b	_	8.8 (0.9)	b	_	_	_	_	_	_	
		Length	9	2339 (268)	а	_	11.3 (1.9)	а	_	_	_	_	-	-	
		Mean	18	1992 (332)	_	а	10.1 (1.9)	_	b	-	_	_	-	-	
		_	_	-	_	_	-	_	_	22	0.96 (0.14) a	13	7.0 (0.6) b	10.3 (1.0) b	
	Conventional	_	24	2026 (71)	а	а	11.2 (0.6)	а	а	119	0.46 (0.03) b	75	11.2 (0.8) a	16.4 (0.7) a	
≈455	Adapted	Cross	9	725 (105)	В	_	3.2 (0.6)	В	_	_	_	_	-	-	
		Length	9	898 (107)	А	_	4.2 (0.5)	А	_	_	_	_	-	-	
		Mean	18	811 (136)	_	А	3.7 (0.7)	_	А	_	_	_	-	-	
		_	-	-	_	_	-	_	_	24	0.52 (0.08) A	13	5.7 (0.5) B	7.5 (0.8) B	
	Conventional	_	24	772 (46)	В	А	4.2 (0.5)	А	А	117	0.23 (0.03) B	75	8.3 (0.8) A	11.5 (0.7) A	

**Table 1**Averaged (adapted particle orientation) and normalized panel properties (conventional particle orientation) for the two targeted densitylevels "High" (~600 kg/m<sup>3</sup>) and "Low" (~455 kg/m<sup>3</sup>)

Displayed data: mean value ( $\pm$  standard deviation) homogenous group; I and II: pairs of data being compared with each other; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

in Length-direction are equal to reference samples. Neglecting differences in the structure of the panel with adapted particle orientation in the core layer (Length- and Crossdirection) by forming the mean of both data, no differences were found between the bending properties except for MOR at 600 kg/m<sup>3</sup> (second pairs of data being compared; II in Table 1).

As can be seen from Fig. 1d, IB of panels with adapted particle orientation almost doubles that of panels with conventionally oriented particles in both the high-density and the low-density levels, and is statistically significant (Table 1). TS of panels with adapted particle orientation in the core layer was found to be superior to that of panels with conventionally oriented particles after 2 and 24 h of water immersion (Fig. 1e). Differences were found to be statistically significant (Table 1). The averaged and, to a consistent thickness of 16 mm, normalized density profiles of reference samples, high-density samples (mean sample density: 599 kg/m<sup>3</sup>), and low-density samples (mean sample density 452 kg/m<sup>3</sup>) of panels adapted particle orientation in the core layer are displayed in Fig. 1f. Density profiles of panels with adapted particle orientation, both high- and low-density, were slightly more pronounced in comparison to those of nearly the same density reference samples.

Although the targeted particle orientation in the mat after spreading and in the panel's core layer after pressing was not examined quantitatively, its presence (and still maintenance after pressing) can be concluded from significantly improved IB and TS. Still slightly, but yet more pronounced density profiles were assumed to indicate that the direction of core layer particle spreading and, thus, particle orientation has an influence on the mat's compression behaviors. It was however surprising that the more pronounced density profiles are not accompanied by increased bending properties. The targeted structural set-up of the core layer may serve as an explanation, since it cannot evenly assist the face layer in the support of resulting forces from bending loads as conventional spread core layer particles can do. In contrast to panels with the core layer particles spread between upright positioned caul plates, the core layer particles of conventionally spread PB are oriented lengthwise coincidental in the panel's plain direction and, thus, serve as a strengthening element. The strengthening effect of the core layer was mentioned by Wyss (1981), when comparing the mechanical principals of PB manufactured in accordance with the Fahrni and the Behr-Homogenholz procedure. While the bending strength of the Fahrni panel was realized by a special kind of face layer particles, fine face layer particles of the Behr-Homogenholz panel needed the core layer as a strengthening element to provide sufficient properties. Panels with core layer particles spread between upright positioned caul plates can just provide a support of the face layer in the case of the panel Length-direction, as here lengthwise oriented particles were found. This means in sum, that the benefits of the higher face layer density can only be effective if the core layer provides a certain amount of strength support in the form of lengthwise oriented particles. Otherwise the weak tensile and compressive strength of the core layer in the plane direction covers this effect.

Improved IB and TS can be explained by the higher strength and the lower swelling properties of the wood in grain than in the radial and tangential direction. The oblique and partially vertical oriented particles in the core layer presumably serve as reinforcement and have a barrier effect like crosswise-adhered veneers in the case of plywood.

#### 4 Conclusion

Test panels of low and common density were made by spreading the core layer particles between vertically positioned caul plates, intending to compare their properties with those of references without adapted core layer particle orientation. This approach aimed to investigate the potential of more or less vertically oriented particles in the core layer in order to counteract decreased properties from density reduction in wood-reduced PB production. Particle orientation in the core layer was assumed to be beneficial in terms of material efficient panel manufacture, as the mechanical strength and the swelling properties in the wood's grain direction are superior to those in the radial and tangential direction. Aside from a direct improvement of IB and TS, an increase of the core layer compression resistance has, thus, a more pronounced density profile (in particular high face layer densities) and, in consequence, improved bending properties were expected. The missing improvement of bending properties was concluded to be a result of the core layer particle orientation, which enables the core layer to assist the face layer in the support of forces resulting from bending loads. Possible benefits of the higher face layer density were covered by the weak tensile and compressive strength of the core layer in the plane direction. Improved IB and TS were explained by the higher strength and the lower swelling properties of the wood in grain direction and the resulting barrier effect from oblique and partially vertically oriented particles in the core layer.

To benefit from the advantages of core layer particle orientation, a supporting layer has to add or use specially shaped particles as face layer material. To increase the number of vertically oriented particles in the core layer, the particle spreading between upright positioned caul plates has to be arranged with an additional guiding device. Acknowledgements The authors thank the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Gülzow, Germany) for its financial support. We also thank the research partner Stuttgart University, Institute of Machine Tools (IfW) (Stuttgart, Germany), especially Mr. Matthias Schneider, Mr. Dan Talpeanu and Dr.-Ing. Thomas Stehle. And also the industry partners Kronopol Sp z o.o. (Zary, Poland), especially Prof. Dr. Joachim Hasch and Mr. Maik Hirschberg; Leuco Ledermann GmbH & Co. KG (Horb am Neckar, Germany), especially Dr. Martin Dressler; and Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG (Zweibrücken, Germany), especially Dr. Helmut Roll; for their involvement in the project. Special thanks go to all those persons who were engaged in the experimental realization and data analysis, namely Mrs. Dörte Bielenberg, Mrs. Sabrina Heldner, Mrs. Bettina Steffen, and Mr. Hannes Wagner (all Thünen Institute of Wood Research).

#### References

- Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. Eur J Wood Prod 75(1):55–62
- Berggren P (2014) Industrialisierung moderner Leichtbauwerkstoffe für den Möbelbau [Industrialization of modern light-weight materials for furniture construction]. Leichtbau-Symposium, Herford, Germany, 4 December 2014. In: Benthien JT (2014) Mega-Trend, Zukunftsmusik oder Sackgasse? [Mega-trend, visions of the future or dead end?]. Holz-Zentralblatt 141(3):58–59
- Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime—Technologie und Einflussfaktoren [Wood-based panels and adhesives—technology and influencing factors]. Springer, Berlin
- Fahrni F (1942) Verfahren zur Herstellung von Kunstholzplatten [Method of producing artificial wood panels]. DBP 967328, 1942.
  In: Wyss O (1981) Zur Patentgeschichte der Spanplatte-Teil 1 [The history of particleboard patents-part 1]. Holz Roh Werkst 39:399–404
- Plath E, Schnitzler E (1974) Das Rohdichteprofil als Beurteilungsmerkmal von Spanplatten [The density profile as assessment characteristic of particleboard]. Holz Roh Werkst 32:443–449
- Wyss O (1981) Zur Patentgeschichte der Spanplatte [The history of particleboard patents]. Holz Roh Werkst 39:399–404

Publikation IV



# Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties

Jan T. Benthien<sup>1</sup> · Jan Lüdtke<sup>1</sup> · Martin Ohlmeyer<sup>1</sup>

Received: 18 June 2018 / Published online: 7 September 2019 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2019

#### Abstract

To reduce the raw material content in particleboards, the influence of core layer particle geometry on panel properties was compared for lightweight particleboards (500 kg/m<sup>3</sup>) and conventional panels (650 kg/m<sup>3</sup>). Specifically, the bending strength and modulus of elasticity, internal bond strength, thickness swelling, water absorption, and density distribution perpendicular to the plane direction were evaluated. Industrial core layer reference particles were obtained and compared to laboratory-made particles by varying the cutting blade projection of the knife ring flaker during chipping. The particles were then classified as Thin, Normal, or Thick after assessment by manual gauging. Additionally, sieve analysis and image analysis were applied for particle size or particle dimension measurement. Based on particle surface calculations (in square metres per mass of dry particles) and the mass of solid adhesive in relation to the mass of dry wood, the surface-specific adhesive amount was calculated. As the cutting blade projection during particle preparation determines the particle dimensions, it also controls the surface-specific amount of adhesive. With increasing particle thickness, the internal bond strength for both conventional and lightweight panels also increased. Normal particles showed the best mechanical results, whereas other correlations between mechanical properties and particle thickness were insignificant. Moreover, most laboratory-made particle variations outperformed the industrial reference. Thickness swelling of the lightweight panels, particularly after 24 h, was either equal to or less than that of conventional panels. The density profile was predominantly unaffected by the core layer particle thickness. Overall, these results suggest that the core layer particle thickness and the thickness-related changes of adhesive coverage of the core layer particles have only little effect on the key physical and mechanical properties of lightweight panels. In practical application, an increase in core layer particle thickness seems to be unable to maintain bending properties in wood-reduced particleboards on the same level as in conventional density particleboards.

#### 1 Introduction

Lightweight particleboards are currently the focus of significant research and development in the wood-based panel industry, and most producers of wood-based panels offer a lighter weight option within their portfolio (Hasch 2017). Unlike the name suggests, lower weight is often a sub-goal driven by niche market demands; the key objective is greater cost efficiency in the short term and optimised material efficiency in the long term. Optimised material efficiency originates from the increasing demand for biomass due to globally increased population and consumption, and its related material and energy requirements. Regardless of the driving

Jan T. Benthien jan.benthien@thuenen.de force for material reduction, it is desirable to produce an equivalent functional unit of particleboard using less wood material; i.e., a wood-reduced panel. However, a reduction in wood material may result in deteriorated panel properties (Kollmann 1966). As each batch of industrially produced panels is already optimised to meet customer-specific requirements at minimal cost, no further reduction in panel properties is tolerable. Thus, relevant panel properties need to be maintained while simultaneously reducing the amount of wood in the panel. In this way, functionally optimised panels can be obtained. Therefore, currently established processes such as raw material selection or processing technology must be adapted. Raw material selection may include the use of alternative wood species or materials, whereas processing technology may include chipping, sorting, matforming, or pressing.

The use of low-density wood species for lightweight panels typically results in a reduction in panel properties

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstrasse 91, 21031 Hamburg, Germany

because 5% compression of the wood material is required during pressing to achieve sufficient wood–wood bonding areas (Irle and Barbu 2010). However, the use of low-density wood species for panel manufacture in Europe is uncommon because the availability of such species is typically regionally limited, with an average supply radius of approximately 143 km (EPF 2017).

According to Niemz et al. (1988) and Hänsel et al. (1988), five structural parameters influence particleboard properties, of which the first (1) one is raw material selection. The others are as follows:

- 2. particle geometry (dimension and shape),
- 3. particle orientation perpendicular to and in the panel plane direction,
- cross-section structure (density profile and distribution of particle sizes perpendicular to the plane direction/ type of layer-wise assembly), and
- 5. type of particle adhesion (adhesive type, content and distribution).

These structural parameters have a major macroscopic influence on the panel properties, whereas changes at microscopic and sub-microscopic levels are minor. They classified parameters (1) and (2) as particle properties and (3) and (4) as the arrangement of components. Dunky and Niemz (2002) applied a further approach to systemize parameters influencing panel properties. They sorted the parameters into five sections: wood, adhesive, production conditions, density, and moisture and temperature.

Against this background, it is possible to classify the measures required to maintain the same selected panel properties as conventional particleboards with a simultaneous reduction in wood material following the scheme proposed in Fig. 1. In accordance with this scheme, industrially applied concepts for lightweight particleboards can be clearly sorted.

In a conventional particleboard, there is a distinction between adjustment of the material and adjustment of the structural design. Material adjustment may involve adapting the particle geometry or the material itself; changes in particle geometry relate to changes within single mat



Fig. 1 Classification of measures employed to maintain the properties of wood-reduced particleboards at those of commercially manufactured panels

layers and changes in the material relate to the wood species and adhesive applied. Therefore, substitution of wood with a non-wood light filler material constitutes a material adjustment. Adjustments of the structural panel design are further divided into changes in panel density or particle orientation, the former of which includes the vertical density profile, horizontal density profile, and periodical changes in the density profile, and the latter of which includes the particle position in the panel plane direction and particle orientation perpendicular to the plane direction. Applications of these adjustments include panels incorporating non-wood light fillers in the core layer, the substitution of wood by annual plant residues (e.g., straw), the use of thin strands instead of conventional particles, and variations of the horizontal density profile (dual-density board).

In this study, the effects of changing the particle geometry to maintain the properties of wood-reduced particleboard are investigated. The research is based on the following considerations:

- previous results showed a simultaneous reduction of both the core and face layer density with reduced core layer material usage (Benthien and Ohlmeyer 2017),
- a high surface layer density is required in order to meet coating requirements and absorb tension and compression forces in bending applications,
- it is assumed that high compression resistant core layer particles enable the formation of high-density face layers at concurrently low core layer density, and
- findings from a previous study (Benthien et al. 2018) indicated the higher compression resistance of largesized particles in comparison to small-sized particles.

Therefore, this study aims to investigate the influence of core layer particle thickness on the properties of conventional density panels (650 kg/m<sup>3</sup>) and wood-reduced panels (500 kg/m<sup>3</sup>). Based on the results, this study analyses whether changing the core layer particle thickness can maintain the same particleboard properties in wood-reduced panels as those in conventional density panels. Core layer particle thickness is set according to its relationship with the cutting blade projection across the knife ring flaker's inner surface and proven through extensive particle size characterization. Particle dimension measurements derived from image analysis are also used to document the effect of core layer particle size on the particle surface-specific adhesive amount. This work differs from previous research in this field, which was conducted without determining the individual particle dimensions (Dunky 1988, 1998; Dunky and Niemz 2002). Furthermore, the particle fraction yield after chipping is determined in order to investigate the effect of adjusting the cutting blade projection on particle rejection.

#### 2 Materials and methods

#### 2.1 Materials

Core layer particles of different thickness (thin, normal, thick) were prepared primarily from softwood chips (*Pinus sylvestris*) by applying an industrial-scale knife ring flaker at the Pallmann Research and Technology Center (PRTC) (Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Zweibrücken, Germany). The three different thicknesses were obtained by varying the cutting blade projection. The effective depth of the cut was defined by the projection of the knife over the knife holders' wear plate (Fig. 2). After manufacture, the particles were manually dried in a wood-drying kiln (fresh air/exhaust air) with a target moisture content of below 20% and further sieve fractionated for each core layer particle type (Thin, Normal, Thick) into the 'good fraction' (1.5–8 mm), and the rejected 'fines' (<1.5 mm) and 'oversize' (>8 mm) fractions.

The wood chips, face and reference core layer material, liquid urea–formaldehyde (UF) adhesive (solid content 67%), and paraffin emulsion (solid content 50%) were provided by an industry partner (Swiss Krono sp z o.o., Zary, Poland). Ammonium nitrate ( $NH_4NO_3$ ) solution with 40% solid content was used as a hardener.

The particles made at the PRTC are subsequently referred to as 'lab-made' and those made at the particleboard plant as 'industrially made'. The latter were used as reference particles.

#### 2.2 Moisture content

The particle moisture content was determined in accordance with DIN EN 322 (1993).



**Fig. 2** Schematic cross-sectional view through the rotor and knife ring of a knife ring flaker, showing the cutting blade projection ('flake thickness setting') as the distance between the 'wearplate circle' and 'flaking knife circle'. Modified from Plough (1974)

#### 2.3 Rate of chipping yield

The yield of 'fines', the 'good fraction', and 'oversize' particles were determined as a percentage with respect to the overall mass of particles sieved and considering the moisture content of each fraction.

#### 2.4 Determination of geometric particle characteristics

Samples for geometric characterization were taken after adhesive application (except for industrially made particles) and air-conditioned at 20 °C/65% RH (relative humidity) until equilibrium moisture content (EMC) was reached.

#### 2.4.1 Bulk density

The bulk density of lab-made particles was calculated using the mass of particles that filled the volume of a 1 L beaker, which was tested three times. The bulk density of the industrially made core layer particles was calculated using the mass of a material volume of 2000 cm<sup>3</sup>, as described in Benthien and Ohlmeyer (2017).

#### 2.4.2 Sieve analysis

Sieve analysis (DIN 66165-1 (2016); DIN 66165-2 (2016)) was performed by applying a horizontal sieve machine (AS 400 control) from Retsch GmbH (Haan, Germany). Sieving time was 5 min with a rotation speed of 240 rpm and a mass of each sample (threefold determination) of 46 g. The following mesh widths of the applied sieves (200-mm diameter) were chosen: 0.8, 1, 1.6, 2, 3.15, 4, 5, 8, 11.2, and 16 mm.

Graphical representation of the data was performed in accordance with DIN ISO 9276-1 (2004), using a histogram of the mass distribution density ( $\overline{q_3}$  [x]) and mass-based cumulative distribution (Q<sub>3</sub> [x]). For the histogram plot, each mass of particles remaining on a sieve (sieve residue) was related to the total mass (outcome: relative share). Then, each relative mass of sieve residue was divided by its size class width. The size class width was the difference between the mesh width of the upper sieve and the mesh width of the sieve containing the residue. The data basis for the cumulative distribution plot was obtained by converting the relative residues to percentage values, then successively summing them for each size class.

The mean particle size was calculated as the sum of the product of the relative share and mean particle size of each size class. The quantile values (D10, D50 [median], D90) were calculated by summing the class widths (or part of them) to account for 10% (D10), 50% (D50), or 90% (D90) of the total sieve residues. If only a part of the width of a size

class was relevant, it was linearly interpolated between the mesh width of the sieve containing the residue and the mesh width of the upper sieve. As each particle type was sieve analysed three times, the reproducibility of each characteristic value was estimated by the standard deviation. On this basis, any differences in the size (distribution) of the particle types were statistically investigated. The width of the size distribution was indicated by the span of the distribution calculated by Eq. 1.

Span = 
$$\frac{D90 - D10}{D50}$$
 (1)

## 2.4.3 Image analysis-based determination of particle length, width, surface area, and aspect ratio

Particle size analysis (ISO 13322-1 (2014); ISO 13322-2 (2006)) (length, width, surface area, and aspect ratio measurement) was conducted by applying a combination of two image analysis systems. For image acquisition, a transmitted light scanner (Epson Perfection V750 Pro, Epson America Inc., Long Beach, CA, USA) was applied. Three scans were performed for each particle type. 6 g of airconditioned (20 °C/65% RH) particles were imaged (16-bit grey scale) with a resolution of 300 dpi and an image size of  $254 \times 203.2$  mm<sup>2</sup>, which resulted in a pixel edge length of 84.7 µm. The particles were spread manually onto a glass sheet in order to ensure sufficient separation from each other. For image processing, the FibreCube (Benthien et al. 2014) software FibreBench (Hamburg University, Department of Informatics, Scene analysis and visualization, Hamburg, Germany, Version 1.7, Revision 1901) was used, while the flowline tracing algorithm (Seppke et al. 2015) was switched off so that particle dimensions were determined by the image moment method (rectangle model) alone.

Graphical representation of the length and width measurement data was conducted in accordance with DIN ISO 9276-1, yielding a histogram of both the length and width distribution density ( $\overline{q_1}[x]$ ), as well as the length- and widthbased cumulative distribution ( $Q_1[x]$ ). In contrast to a number distribution, where the frequency of the measured characteristic is plotted based on either the length or width, the plot was based on the sum of the measured characteristic of each length and respective width class. The procedure for data processing (i.e., setting the proportion of each size class in relation to the sum of the measured characteristic, dividing this value by the size class width, further preparing the plot, and producing the plot itself) is similar to the graphical representation of the sieve analysis results.

The width of the first length class was set to 0.5 mm. With increasing particle length, the width of the length classes was logarithmically increased. Therefore, the upper bin limits were 0.5, 0.7, 0.98, 1.37, 1.92, 2.69, 3.76, 5.27, 7.38, 10.33, 14.46, 20.25, 28.35, 39.69, and 55.56 mm. The upper limits of the width classes were 0.5, 0.7, 0.98, 1.37, 1.92, 2.69, 3.76, 5.27, and 7.38 mm. As only particles longer than 1 mm were evaluated, the first bin of the length distribution containing data was 0.98-1.37 mm. The mean particle length was calculated by dividing the sum of all particle lengths by their count. Then, the 10% quantile (D10 or x10), 50% quantile (D50 or x50), and 90% quantile (D90 or x90) of the length-based cumulative distribution were calculated. D50 represents the median of the length-sorted raw data set. The same specific values were calculated for the width measurement. As further characteristic values, the number of particles found per particle sample (sum of the replicate measurements) and the length (width) of the longest (widest) particle of each particle type (mean of the three replicate measurements) were given.

From the length and width measurement, the particle aspect ratio was calculated. It was used here as a shape factor, giving the relationship between two particle dimensions. Following the graphical representation of length and width data, the relative frequency distribution and the relative cumulative distribution of the shape factor was displayed, although the aspect ratio cannot be expressed as a length measure on the abscissa axis. The characteristic values of aspect ratio distribution (mean, D10, D50, and D90) were calculated in the same way as for length and width distribution.

As three samples were measured as replicates for each particle type, the reproducibility of each characteristic value can be estimated by the standard deviation. Thus, any statistical differences in the length, width, and aspect ratio (distribution) of particle types were investigated. The length, width, and aspect ratio distribution width was indicated by the span of the distribution calculated by Eq. 1.

In addition to length, width, and aspect ratio, the projection area of each particle was determined by summing the area of pixels with a grey scale above a defined threshold value within the particle-delimiting rectangle. The particle surface area was approximated by doubling the projection area, following a simplified approach by Dunky and Niemz (2002), which assumes the front and side edges to be negligible for surface calculation provided that particle thickness is much less than particle length.

A more compact graphical representation of the length (width)-related length (width) distribution was obtained by drawing box-whisker-plots. For this, the quantiles (D10, D50, and D90) were applied, as well as the minimum and maximum particle length (width), and the average. The minimum and maximum particle length (width) were displayed as whiskers, the D10 and D90 values as box, the median as a vertical line in the box, and the average value as a dot.

#### 2.4.4 Thickness measurement

Particle thickness was measured by manually gauging the thickness of 45 particles from each particle type (Thin, Normal, Thick, Reference). The particles were taken from the image analysis samples, with 15 particles for each replicate measurement. Particle selection was based on their manageability by hand and not according to a target in order to obtain a representative sample.

#### 2.5 Panel manufacturing

Three-layer panels with a nominal thickness of 16 mm and target gross densities of 500 and 650 kg/m<sup>3</sup> were produced on a computer-controlled laboratory single-daylight hot press (Siempelkamp GmbH & Co. KG, Krefeld, Germany). Adhesive was applied on the particles in a drum blender equipped with an air-atomizing spray system. Face layer additives were 1% hardener, 1% urea (both based on the resin solid content), and 0.5% paraffin emulsion (based on the dry wood mass). For the core layer material, only 3% hardener was added. The amount of additional water was calculated according to the particle moisture content and added to the aqueous adhesive solution. The target moisture content was set to 11% for the face layers and 8% for the core layer. The adhesive content was 1% (based on dry wood mass) in the face layers and 8% in the core layer. With respect to the target panel gross density and, thus, the faceto-core layer ratio  $(35/65 \text{ at } 650 \text{ kg/m}^3 \text{ and } 46/54 \text{ at } 500 \text{ kg/})$ m<sup>3</sup>), particles were weighed and formed into mats on an aluminium caul plate using a  $695 \times 595 \text{ mm}^2$  forming box. The face-to-core layer ratio differed for dense and light panels, as only the mass of the core layer particles was reduced to reduce panel density. After removing the forming box, a second aluminium caul plate was laid on top of the mat and both were covered with siliconised paper to prevent adherence between panel and caul plates.

At a press plate temperature of 200  $^{\circ}$ C, the mats were compressed with a pressing time factor of 8 s/mm (effective press time 128 s). The closing time of the press was 6 s. Within the first 20 s after press closure, a thickness of 15.5 mm was sought at a maximum specific pressure of 4 N/ mm<sup>2</sup>. During the following 100 s, the maximum specific pressure was reduced from 1.5 to 1 N/mm<sup>2</sup> while the thickness was increased to a nominal panel thickness (16 mm). Plate positions were kept constant for 8 s while the specific pressure was decreased further stepwise (0.5 N/mm<sup>2</sup> per step). After hot-pressing, the panels were cooled under ambient conditions then stored at 20 °C and 65% RH for at least one day before sample cutting.

#### 2.6 Surface-specific adhesive calculation

Calculation of the amount of surface-specific adhesive was conducted according to the following four steps (see also Table 1).

- Adjusting the mass of investigated particles (conditioned and adhesive-applied) for the moisture content to obtain the dry mass of adhesive-applied particles (e.g. 6 g/107% = 5.6 g).
- 2. Adjusting the dry mass of investigated particles for the solid adhesive mass, which was applied to the particles before panel manufacture in respect to the adhesive content (e.g. 5.6 g/108% = 5.2 g).
- 3. Dividing the calculated surface area by the pure dry wood mass (e.g.,  $0.085 \text{ m}^2/5.2 \text{ g} = 0.016 \text{ m}^2/\text{g}$ ).
- 4. Dividing the solid adhesive mass per gram dry wood (0.08 g at an adhesive content of 8%) by the relative particle surface area per gram pure dry wood (e.g., 0.08 g/0.016 m<sup>2</sup>=4.9 g/m<sup>2</sup>).

#### 2.7 Experimental setup

A total of 24 experimental particleboards were produced, consisting of three panels for each of the eight panel types. As the parameters influencing panel properties, the core layer particle type (Thin, Normal, Thick) and panel gross density (500 and 650 kg/m<sup>3</sup>) were varied. As reference, panels with a core layer made from particles used in the conventional production (Reference) were also produced. The design of the experiments is illustrated in Table 2.

 Table 1
 Basis data for the calculation of the surface-specific adhesive amount and obtained results in respect to particle type

Particle type	Thin	Normal	Thick	Reference
Surface area <sup>a</sup>	0.085 m <sup>2</sup>	0.061 m <sup>2</sup>	0.048 m <sup>2</sup>	0.041 m <sup>2</sup>
Moisture content <sup>b</sup>	7.0%	7.0%	6.8%	10.8%
Pure dry wood mass	5.2 g	5.2 g	5.2 g	5.0 g
Particle surface area per gram pure dry wood	0.016 m <sup>2</sup> /g	0.012 m <sup>2</sup> /g	0.009 m <sup>2</sup> /g	0.008 m <sup>2</sup> /g
Solid adhesive mass per gram dry wood	0.08 g	0.08 g	0.08 g	0.08 g
Surface-specific adhesive amount	4.9 g/m <sup>2</sup>	6.8 g/m <sup>2</sup>	8.7 g/m <sup>2</sup>	10.6 g/m <sup>2</sup>

<sup>a</sup>6 g particles

<sup>b</sup>Conditioned and—when applicable—adhesive applied particles

 Table 2
 Produced panel types in respect to influencing parameters (target gross density and particle type)

Panel type	Target gross density (kg	/m <sup>3</sup> ) Particle type
1	650	Thin
2	650	Normal
3	650	Thick
4	650	Reference
5	500	Thin
6	500	Normal
7	500	Thick
8	500	Reference

#### 2.8 Sample preparation and testing procedure

Prior to sample cutting, test panels were trimmed to a size of  $500 \times 400$  mm<sup>2</sup>. With respect to the number of replicates for each panel type (*n*=3), the number of test specimens for each core layer particle type and target gross density was as follows:

- 12 (4×3) for measuring bending strength (modulus of rupture=MOR) and bending modulus (modulus of elasticity=MOE) according to DIN EN 310 (1993),
- 24 (8×3) for measuring internal bond strength (IB) according to DIN EN 319 (1993),
- 15 (5×3) for measuring thickness swelling (TS) according to DIN EN 317 (1993), and
- 9  $(3 \times 3)$  for measuring the density profile.

Prior to testing, specimens were conditioned at 20 °C and 65% RH until a constant mass was reached. Thickness swelling was determined after 2 h and 24 h of water immersion (TS 2 h and TS 24 h, respectively). Simultaneous to the measurement of sample thickness swelling, the increase in mass after water immersion was determined. The mass of absorbed water is expressed as a percentage of the initial sample weight and designated as water absorption (WA). Fifteen specimens were tested for each core layer particle type and target gross density. The mean gravimetric panel gross density was determined according to EN 323 (1993) for all test specimens (n = 480).

Density profiles were measured on the basis of the radiometric principle using the Dax 6000 measurement instrument (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld, Germany). The measurement speed was set to 0.25 mm/s. Beginning from the panels' lower side (from pressing), the samples were scanned stepwise (step size 0.02 mm) and the density for each scan spot was determined. The obtained data sets (scan spot position and density) were normalised to a consistent panel thickness of 16 mm and the mean density 
 Table 3
 Rates of chipping yield for fines, good fraction, and oversize in respect to particle type (Thin, Normal, Thick)

Particle type	Fines (%)	Good fraction (%)	Oversize (%)		
Thin	17	55	28		
Normal	10	54	36		
Thick	10	46	44		

profile for each panel type was calculated and plotted. In addition, characteristic values such as maximum density, upper and lower side density, minimum density, and mean (radiometric) panel density were calculated from this data set.

#### 2.9 Statistical analysis

Statistical analysis was conducted by applying the analysis tool JMP from the SAS Institute, Cary, NC, USA. The normal distribution check was conducted by applying the Shapiro-Wilk-Test at a significance level of  $\alpha = 0.01$ . Regardless of whether the samples were from normally distributed populations, the check for homogeneity of variance at a significance level of  $\alpha = 0.05$  was performed simultaneously. In the case of balanced samples, the Levene-Test was used. In the case of unbalanced samples, the Brown-Forsythe-Test was used. As both normal distributions and homoscedasticity were found, analysis of variance (ANOVA) at a significance level of  $\alpha = 0.05$  was used to determine any differences between samples. This was done regardless of whether samples were balanced or unbalanced. To check pairwise the exact locations of the differences, a so-called posthoc analysis at a significance level of  $\alpha = 0.05$  was conducted. The Tukey-Test and Tukey-Kramer-Test were used for balanced and unbalanced samples, respectively. As a result of the posthoc analysis, differences between samples were indicated by letters assigning groups of statistical distinctiveness (homogeneous group = HG). Different letters indicate statistical difference; identical letters indicate samples originating from the same population.

#### **3 Results**

#### 3.1 Rate of chipping yield

The rates of chipping yield are given for each lab-made particle type in Table 3. The highest content of 'fines' was observed for the thin particle type. The content of 'oversize' increased with increasing blade projection. The amount of 'good fraction' was highest with a low blade projection and lowest with a large blade projection.
#### 3.2 Geometric particle characteristics

#### 3.2.1 Bulk density

The bulk density of the core layer particles was 140 ( $\pm 8$ ) kg/m<sup>3</sup> (Thin), 170 ( $\pm 4$ ) kg/m<sup>3</sup> (Normal), 166 ( $\pm 6$ ) kg/m<sup>3</sup> (Thick), and 158 ( $\pm 8$ ) kg/m<sup>3</sup> (Reference). Statistical analysis showed that the bulk density of the Thin particle type (HG=A) was different from those of the other particle types (HG=B). No differences were found for the bulk densities of the Normal, Thick, and Reference particle types (all HG=B). The face layers particle bulk density was 173 ( $\pm 16$ ) kg/m<sup>3</sup>. The bulk density of Reference and face layer particles were determined in a previous study (Benthien and Ohlmeyer 2017).

#### 3.2.2 Sieve analysis

The sieve analysis results are shown in Fig. 3. The amount of fine particles decreased with increasing cutting blade projection, whereas the amount of coarse particles increased. The highest degree of similarity was observed between the Reference and Thick particle types, although the amount of coarse particles (size class 5–8 mm) was even higher than that of the Thick particle type. A similar result was found for the characteristic values of particle size distributions (Table 4). Minor cutting blade projections resulted in low mean particle size values while larger projections resulted in

larger ones. At minor cutting blade projections, the quantiles of particle size distribution were reached at lower sizes; at larger projections, the quantiles were reached at larger particle sizes. No statistical differences were observed between Normal and Thick particle types but Thin and Reference particles typically exhibited a statistical difference to Normal and Thick particles. A plot of the size distribution of face layer particles can be found in Benthien and Ohlmeyer (2017).

#### 3.2.3 Image analysis

Figure 4 shows the particle length, width and aspect ratio distributions of all particle types, which differed between the lab-made particles (Thin, Normal, Thick) and the industrial particles (Reference). The lab-made particles showed higher amounts of small length, small width, and low aspect ratio particles, whereas the industrially made particles were characterised by more long, wide, and high aspect ratio particles. For the lab-made particles, particle length and width increased with increasing cutting blade projection. An increase in particle aspect ratio was only observed between Thin and Normal particles.

Figure 5 indicates the characteristics values (mean, quantiles, minimum value, maximum value) of particle length and width distribution. The dimension and shape characteristic values and statistical evaluations are given in Table 5 (length), Table 6 (width), and Table 7 (aspect



**Fig. 3** Histogram,  $q_3(x)$ , of the density distribution and cumulative distribution,  $Q_3(x)$ , of the particle size distribution of different particle types: Thin, Normal, Thick, and Reference, obtained by sieve analysis

**Table 4** Characteristic particle size values (mean particle size [mean], 10% quantile [D10], 50% quantile [D50], 90% quantile [D90], distribution span [span]) obtained by sieve analysis data with results (homogeneous groups) from statistical analysis

Particle material	Mean (mm)	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Span (–)
Thin	1.8 (0.1) A	0.6 (0.1) A	1.5 (0.1) A	3.4 (0.3) A	1.82 (0.07) B
Normal	2.2 (0.1) B	1.0 (0.0) B	1.9 (0.0) B	3.8 (0.1) AB	1.53 (0.05) A
Thick	2.4 (0.1) B	1.0 (0.1) B	2.1 (0.1) B	4.1 (0.2) B	1.45 (0.04) A
Reference	2.8 (0.1) C	1.1 (0.1) B	2.4 (0.2) C	5.1 (0.2) C	1.66 (0.17) AB

Given values: mean value ( $\pm$  standard deviation) homogeneous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 



**Fig. 4** Histogram,  $q_1(x)$ , of the density distribution and cumulative distribution,  $Q_1(x)$ , of the particle length (**a**, **d**, **g**, **j**) and width (**b**, **e**, **h**, **k**) distribution, as well as the relative frequency and cumulative frequency distribution of particle aspect ratio (**c**, **f**, **i**, **l**) for different

particle types: Thin (a, b, c), Normal (d, e, f), Thick (g, h, i), and Reference (j, k, l), obtained by image analysis-based particle size measurement

ratio). For particle length (Table 5), except for the 10% quantile, the Reference particle type differed significantly from the other particles (mean, D50, D90). For mean particle length and quantiles (D10, D50, D90), significantly higher values were observed for the Thick particle type than for the Thin particle type. Typically, no differences were found between Thin and Normal or Normal and Thick. No differences were found in the maximum particle length. For particle width (Table 6), only the 90%

quantile of the Thick particle type differed from that of the Reference particle type. Among the lab-made particles, except for D10, significant differences were found between Thin and Thick particle types. No differences were found in the maximum particle width. Clear differences in the particle aspect ratio (Table 7) were found between lab-made particles and reference particles for the 50% and 90% quantiles. Differences among the lab-made particles were not thought to be meaningful. The numbers of particles



Fig. 5 Box-whisker-plot of particle length (a) and width (b) characteristics

investigated in the image analysis were 12,663 (Thin), 4497 (Normal), 2754 (Thick), and 1320 (Reference).

#### 3.2.4 Particle surface area

The mean particle surface area was 14,159 ( $\pm$  820) mm<sup>2</sup> for Thin, 10,153 ( $\pm$  905) mm<sup>2</sup> for Normal, 7948 ( $\pm$  416) mm<sup>2</sup> for Thick, and 6846 ( $\pm$  297) mm<sup>2</sup> for Reference. Thus, Thin (HG=C) and Normal (HG=B) were statistically different. Moreover, their surface areas differed from those of Thick and Reference. No differences were found between the surface areas of Thick and Reference as both were assigned to the same homogeneous group (HG=A) during statistical analysis.

## 3.2.5 Particle thickness

Particle thickness increased with increasing cutting blade projection. Particles manufactured with the lowest cutting blade projection (Thin particle type) had an average thickness of 0.6 ( $\pm$ 0.2) mm. The particle material manufactured with a typical cutting blade projection (Normal) showed an average thickness of 1.0 ( $\pm$ 0.3) mm, while a high cutting blade projection resulted in the greatest thickness (1.4 ( $\pm$ 0.4) mm, Thick). The average thickness of Reference particles was 1.5 ( $\pm$ 0.5) mm. The particle thickness was statistically different for Thin (HG=A) and Normal (HG=B) and both differed from Thick and Reference. Again, Thick and Reference particles were assigned to the same homogeneous

 Table 5
 Characteristic particle length values (mean particle length [mean], 10% quantile [D10], 50% quantile [D50], 90% quantile [D90], maximal particle length [max], distribution span [span]) obtained by image analysis data with results (homogeneous groups) from statistical analysis

Particle type	Mean (mm)	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Max (mm)	Span (-)
Thin	3.8 (0.7) A	1.2 (0.1) A	2.9 (0.7) A	7.4 (1.2) A	43.3 (5.9) A	2.2 (0.2) B
Normal	5.9 (0.8) B	2.5 (0.3) B	4.9 (0.6) AB	10.5 (1.7) AB	40.2 (10.8) A	1.6 (0.1) A
Thick	6.6 (0.4) B	2.4 (0.2) B	5.4 (0.4) B	12.0 (0.9) B	38.7 (9.5) A	1.8 (0.1) AB
Reference	9.7 (1.1) C	3.2 (0.5) B	8.0 (1.3) C	18.4 (1.8) C	43.5 (11.6) A	1.9 (0.2) AB

Given values: mean value (± standard deviation) homogenous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

Table 6	Characteristic p	particle width va	alues (mean	particle wi	dth [mean],	10% qua	intile [D10],	50% quantile	D50], 90%	quantile []	D90], r	maxi-
mal pa	rticle width [max]	], distribution sp	oan [span])	obtained by	image analy	ysis data	with results	(homogeneous	groups) froi	n statistica	al analy	ysis

Particle type	Mean (mm)	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Max (mm)	Span (-)
Thin	1.0 (0.1) A	0.4 (0.0) A	0.8 (0.2) A	1.9 (0.2) A	9.3 (4.7) A	1.8 (0.2) B
Normal	1.5 (0.1) B	0.7 (0.1) A	1.4 (0.1) B	2.5 (0.2) AB	8.1 (0.9) A	1.3 (0.0) A
Thick	1.7 (0.1) BC	0.5 (0.2) A	1.5 (0.1) BC	2.9 (0.3) B	9.5 (0.4) A	1.5 (0.1) AB
Reference	2.0 (0.2) C	0.5 (0.3) A	1.8 (0.2) C	3.7 (0.4) C	13.2 (3.6) A	1.8 (0.3) B

Given values: mean value (± standard deviation) homogenous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

quantile [D90], n	quantile [D90], maximal particle aspect ratio [max], distribution span								
Particle type	Mean	D10	D50	D90	Max	Span			
Thin	4.3 (0.1) A	1.9 (0.1) AB	3.4 (0.1) A	6.6 (0.4) A	146 (27) A	1.4 (0.1) A			
Normal	4.4 (0.4) A	1.9 (0.0) AB	3.7 (0.1) AB	7.3 (0.6) A	70 (84) A	1.5 (0.1) A			
Thick	5.3 (1.4) AB	1.8 (0.1) A	3.8 (0.2) B	8.2 (1.3) A	83 (72) A	1.7 (0.3) A			
Reference	6.8 (0.8) B	2.1 (0.2) B	4.8 (0.2) C	10.9 (1.3) B	113 (26) A	1.8 (0.4) A			

 Table 7
 Characteristic particle aspect ratio values (mean particle aspect ratio [mean], 10% quantile [D10], 50% quantile [D50], 90% quantile [D90], maximal particle aspect ratio [max], distribution span

[span]) obtained by image analysis data with results (homogeneous groups) from statistical analysis

Given values: mean value (±standard deviation) homogenous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

group (HG = C) in the statistical analysis. As only thickness was measured for a non-representative selection of particles, the length and width were determined again by image analysis (15 particles for each replicate measurement) to achieve the complete geometry of particles investigated. The lengths and widths were:

- Thin: 19.2 (±5.1) mm and 4.4 (±1.2) mm,
- Normal: 20.0 ( $\pm$  5.9) mm and 4.4 ( $\pm$  1.2) mm,
- Thick: 20.2 ( $\pm$  5.8) mm and 4.8 ( $\pm$  1.6) mm, and
- Reference: 25.9 (±8.8) mm and 5.2 (±1.9) mm, respectively.

# 3.3 Particle surface-specific adhesive amount

The lowest particle surface-specific adhesive amount  $(4.9 \text{ g/m}^2)$  was calculated for the Thin particle type, followed by Normal (6.8 g/m<sup>2</sup>) and Thick (8.7 g/m<sup>2</sup>). The highest particle surface-specific adhesive amount  $(10.6 \text{ g/m}^2)$  was calculated for the Reference particle type (Table 1).

# 3.4 Panel properties

# 3.4.1 Physical and mechanical panel properties

The physical and mechanical properties of panels with particles manufactured at different cutting blade projections and with industrially manufactured particles in the core layer are shown in Fig. 6 and Table 8. The bending strength and bending modulus of elasticity of different target gross density panels differed significantly from each other. Conversely, no significant differences were observed between the bending properties of panels with a target gross density of 500 kg/m<sup>3</sup> comprising lab-made particles in the core layer, with no influence of particle thickness. The bending properties of panels with a target gross density of 650 kg/m<sup>3</sup> were predominantly uniform. The internal bond strength increased with increasing particle thickness in the core layer from Thin to Normal. A further increase in particle material thickness (from Normal to Thick) did not show a concurrent increase in internal bond strength in low-density panels. However, for highdensity panels, an increase in particle material thickness resulted in decreased internal bond strength. For both high- and low-density panels, no differences were found in the internal bond strength of panels between Reference and Thin particle types in the core layer. Normal particles in the core layer material led to an increase in internal bond strength compared to panels with Reference particles in the core layer. Thickness swelling of panels with a target gross density of 650 kg/m<sup>3</sup> was found to significantly decrease with increasing particle thickness after both 2 h and 24 h of water immersion. No effect of particle thickness on thickness swelling was observed for panels with a target gross density of 500 kg/m<sup>3</sup>.

# 3.4.2 Mean panel density and density profile

The results of radiometric density scanning are given in Table 9 (characteristic values obtained from the dataset) and Fig. 7 (density profiles). Table 9 also presents the results from gravimetric density determination. All panel types showed the typical density distribution perpendicular to the plane direction of the particleboard, with highdensity face layers and a low-density core layer (Fig. 7). Apart from the different density level, the density profile of high target gross density panels was much more pronounced than that of the low target gross density panels. Within each group of target gross density, only the core layer density of the panels containing Reference particles differed from the others. Therefore, no further subdivision of samples was performed, resulting in the following groups: Group 1 (target density 650 kg/m<sup>3</sup>), Group 2 (target density 500 kg/m<sup>3</sup>), and Reference (650 kg/m<sup>3</sup>). Statistical analysis confirmed these results, except for the fact that minimum density exhibited a statistical difference for the high target gross density panels (Table 8). No differences were found between the mean panel density, face layer densities (mean maximum density on both upper and lower sides), or core layer density (mean minimum density) within the individual target gross density groups.







**Fig. 6** Properties of panels with a target gross density of  $650 \text{ kg/m}^3$  and  $500 \text{ kg/m}^3$  and different core layer particle types (Thin, Normal, Thick), as well as Reference particles. **a** Bending properties (MOR=modulus of rupture=bending strength, MOE=modulus of

(bending) elasticity), **b** internal bond strength (IB), **c** thickness swelling (TS), and **d** water absorption (WA). The error bars indicate the standard deviation

Table 8 Properties of panels with a target gross density of 650 kg/m<sup>3</sup> and 500 kg/m<sup>3</sup> with results (homogeneous groups) from statistical analysis

MOE (N/mm<sup>2</sup>)

150

Target gross density level	Particle type	Bending properties		IB (N/mm <sup>2</sup> )	Thickness swelling		Water absorption	
		MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )		2 h (%)	24 h (%)	2 h (%)	24 h (%)
650 kg/m <sup>3</sup>	Thin	16.0 (1.2) B	2813 (155) A	0.52 (0.07) A	14.5 (0.5) D	21.5 (0.8) C	73.8 (4.9) C	90.9 (4.2) B
	Normal	16.8 (1.7) B	3032 (178) B	0.67 (0.05) C	12.6 (0.7) C	19.9 (0.9) B	65.0 (4.4) AB	83.2 (4.0) A
	Thick	15.3 (0.9) AB	2784 (113) A	0.62 (0.03) B	10.0 (1.0) A	18.7 (1.0) A	60.3 (5.3) A	83.1 (3.5) A
	Reference	14.4 (1.3) A	2763 (241) A	0.55 (0.05) A	11.7 (0.7) B	18.9 (1.2) A	65.7 (5.7) B	83.7 (4.6) A
500 kg/m <sup>3</sup>	Thin	6.9 (0.4) b	1330 (89) b	0.31 (0.03) a	11.0 (0.5) c	14.4 (0.7) a	90.1 (9.5) b	108.4 (5.2) b
	Normal	7.1 (0.5) b	1352 (61) b	0.39 (0.03) b	8.6 (0.5) a	13.7 (0.6) a	77.5 (6.5) a	104.1 (4.6) ab
	Thick	7.0 (1.0) b	1396 (158) b	0.39 (0.04) b	9.1 (0.8) a	14.1 (1.1) a	76.6 (8.1) a	101.1 (4.4) a
	Reference	6.0 (0.5) a	1200 (67) a	0.29 (0.03) a	10.2 (0.9) b	13.4 (0.9) a	81.6 (6.3) a	102.3 (4.7) a

Given values: mean value (±standard deviation) homogenous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

MOR modulus of rupture (bending strength), MOE modulus of (bending) elasticity, IB internal bond strength

Target gross density (kg/m <sup>3</sup> )	Particle type	Radiometric principal	Radiometric principal				
		Mean maximum density (lower face layer) (kg/m <sup>3</sup> )	Mean minimal density (kg/m <sup>3</sup> )	Mean maximum density (upper face layer) (kg/m <sup>3</sup> )	Mean panel density (kg/m <sup>3</sup> )	Mean panel density (kg/m <sup>3</sup> )	
650	All <sup>1</sup>	936 (40) B	500 (21) B <sup>1</sup>	931 (47) B	628 (26) B	640 (23) B	
	Thin		497 (25) BC				
	Reference		518 (13) C				
500	All	625 (46) A	398 (23) A	647 (55) A	492 (29) A	502 (20) A	

 Table 9 Results from radiometric density scanning and gravimetric density determination with results (homogeneous groups) from statistical analysis

Given values: mean value ( $\pm$  standard deviation) homogenous group; different letters indicate statistical difference at a significance level of  $\alpha = 0.05$ 

<sup>1</sup>If not other stated

<sup>2</sup>Only particle types Normal and Thick



**Fig. 7** Average density profiles of panels with Thin, Normal, Thick, and Reference particle types in the core layer with a target density of 650 kg/m<sup>3</sup> (Group 1) or 500 kg/m<sup>3</sup> (Group 2). The scan was started at the panel lower side (from pressing)

The radiometric and gravimetric density determination also revealed a lack of difference in mean panel densities.

# 4 Discussion

# 4.1 Chipping yield and geometric particle characteristics

An adjustment to small cutting blade projections at the flaker knife ring led to a high yield of small particles, whereas larger cutting blade projections produced a high yield of coarse particles during chipping. Particle size characterization of the 'good fraction' showed the same correlation; i.e., the mean particle size (sieve analysis), mean particle length and width (image analysis), and mean particle thickness (manually thickness gauging) all increased with increasing cutting blade projection. Thus, cutting blade projection not only affects particle thickness but also all particle dimensions. The number of particles within samples of equal mass further indicates the change of particle dimensions with different cutting blade projection. Therefore, the effect of particle thickness on panel properties cannot be related to the variation of cutting blade projection alone.

By combining the particle count and bulk density analysis, a different particle shape for thin particles was concluded. That is, because the bulk density of Thin particles decreased at increased particle count despite raw material (wood species) and chipping technology were constant (only the cutting blade projection was changed). This means that the particles became more voluminous when smaller because the particle sample was less densely packed.

The approximately uniform maximum particle length (~40 mm) can be explained by the geometry of the wood chips, which was equal for all chipping series (lab-made and industrially manufactured). The approximately uniform maximum particle width (~9 mm) for all lab-made particles corresponds well with the mesh width of 8 mm (diagonal of the 11-mm open spaces) applied to separate the 'oversize' from the 'good fraction'.

A strong correlation (correlation coefficient of 0.94) was observed between particle width and thickness using the mean particle width from image analysis and the mean particle thickness from manual thickness gauging. No correlation was found when using the mean particle width of the thickness-gauged particles. This shows that the type of

data chosen is the key, whether correlations between particle dimensions can be found or not, as described by Dunky and Niemz (2002) and Niemz and Wenk (1989).

As the aspect ratio did not differ between the lab-made particles, a rather uniform shape of particles can be assumed. However, this uniformity applies only to the plane direction. In the thickness direction, the bulk density results indicate non-uniformity. Contrary to expectations, the bulk density decreased with increasing particle thickness. This means that the particles take up more space in the direction of particle thickness, although they do get thinner. The differences between the aspect ratio of industrially and lab-made particles can be explained by the use of different chippers and sieve equipment used to generate the 'good fraction'. Because of the different shape and manufacturing details (chipping, drying, and sieve fractionation), the industrial particles are not an effective reference. Thus, the influence of cutting blade projection should be analysed within the labmade particle series. Nevertheless, the industrially manufactured core layer particles can serve as a rough benchmark for comparison with the size of lab-made particles.

Although image analysis provides a more detailed picture of the particle geometry compared to sieve analysis (length, width, projection area, aspect ratio instead of a quite unspecific size information), a total description of the particle geometry was not obtained. In addition to length and width measurement, particle thickness should be simultaneously measured to obtain data for each particle dimension and a more realistic image of the particles. For example, for particle thickness, the aspect ratio could be divided into form parameters such as slenderness ratio (ratio of length to thickness), width ratio (ratio of length to width), and flatness (ratio of width to thickness) (Niemz and Wenk 1989).

## 4.2 Particle surface-specific adhesive amount

In contrast to the simplified approach by Dunky and Niemz (2002) approximating the surface area of wood particles for particleboard production as the doubled product of length and width of a cuboid body, the calculation of the surface area on the basis of the projection area is much less erroneously. Of cause, the real surface area of a spatially extended object is still greater, but the doubled projection area is a suitable approximation as long as the particle thickness is unknown. In order to consider particle thickness in the surface area calculation and obtain a more realistic particle surface-specific adhesive amount, a more sophisticated image analysis-based particle size measurement system has to be used but is currently not in the market. If the length, width, and thickness data for individual particles were available, realistic model shapes could be applied and a much more accurate geometrical shape would be obtained (e.g.

ellipsoid). If height information was available for each pixel of the projection area of the particle, an exact image of each particle's upper side structure could be obtained. Additionally, an image of the lower side could be created by assuming equal upper and lower surface structures.

## 4.3 Panel properties

Due to the positive relationship between cutting blade projection and core layer particle size, this parameter can be employed to explain differing panel properties. However, it is important to note that a change of particle size is predominantly related to a change of particle surface area and therefore particle surface-specific adhesive amount. Consequently, this must be considered when investigating the effect of differently sized wood particles in the core layer on panel properties without adapting the adhesive content.

Contrary to the expectation that thick and thus high-compression-resistance particle material in the core layer results in high-density and thus load-bearing face layers, neither the face layer density nor bending properties increased with increasing core layer particle thickness. As this applies to both, high- and low-density panels, particle thickness in the investigated range is not a suitable parameter to compensate reduced bending properties due to panel weight reduction.

While internal bond strength increased at the first step of thickness increase (from Thin to Normal particle types), this can hardly be an effect of particle thickness as it is not consistent for all investigated thickness levels. The higher internal bond strength of panels with the Normal particle type in the core layer can neither be attributed to particle size nor to the higher particle surface-specific adhesive amount, as both are higher for panels with the Reference particle type in the core layer. Instead, the improved bonding strength must be an effect of particle surface quality (e.g., fresh cutter blades or a different drying method). Differences in thickness swelling between panels consisting of lab-made and industrially made particles of typical density (intensive drying conditions for industrially made particles) and the increasing particle surface-specific adhesive amount with increasing particle size support this explanation.

# 5 Conclusion

The aim of this study was to investigate whether changing the core layer particle thickness in wood-reduced panels would retain the same particleboard properties as those of conventional density panels. For this purpose, lightweight (500 kg/m<sup>3</sup>) and conventional density (650 kg/m<sup>3</sup>) particleboards with different thickness core layer particle materials were produced and tested. Thorough particle size characterization revealed that different particle thicknesses can be attained by setting the cutting blade projection accordingly. Additionally, image analysis of particle dimensions revealed the effect of core layer particle size on the particle surfacespecific adhesive amount. Therefore, this must be considered when interpreting the results of different research questions.

It is concluded that the investigated range of core layer particle thicknesses did not influence the bending properties of both lightweight and typical density particleboards. This is also true for the particleboard density profile; i.e., Thick particles in the core layer did not increase the face layer compaction or load-bearing capacity. Therefore, contrary to expectations, an increase in core layer particle thickness was unable to maintain the same bending properties in woodreduced particleboards as in conventional density particleboards. The same was concluded for internal bond strength, although this characteristic was improved by increasing particle thickness from Thin to Normal. In conventional density panels, a decrease in the thickness swelling values with increasing particle thickness in the core layer can be plausibly explained by the increase in particle surface-specific adhesive amount. However, no effect of particle thickness was observed in low-density panels.

To conclude, this research showed that the bending properties of wood-reduced panels cannot be maintained at the same level of those of conventional density particleboards. Moreover, no clear effect of core layer particle thickness or particle surface-specific adhesive amount was observed. 2-D image analysis-based particle size characterization provided a broader understanding of the parameters influencing panel properties. However, optical size characterisation needs to be developed including particle high-resolution thickness determination in order to provide a more accurate shape approximation.

Acknowledgements The authors thank the Federal Ministry of Food and Agriculture (Berlin, Germany) for its financial support. We also thank research and industry partners for their involvement in the project 'LeiHoWe' (FNR FKZ 22005613), in particular Prof. Dr. Joachim Hasch (Swiss Krono Group, Luzern, Switzerland) and Mr. Maik Hirschberg (Swiss Krono, Zary, Poland) for the supply of material and Dr. Helmut Roll (Pallmann Maschinenfabrik, Zweibrücken, Germany) for performing works. Special thanks go to those who performed experiments and data analysis, namely Mrs. Dörte Bielenberg, Mrs. Birgit Butenschön, Mr. Nick Engehausen, Mrs. Sabrina Heldner, Mr. Hannes Köhm, and Mrs. Bettina Steffen (all Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany).

# References

Benthien JT, Ohlmeyer M (2017) Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of densitydecreased particleboards. Eur J Wood Prod 75(1):55–62. https:// doi.org/10.1007/s00107-016-1059-5

- Benthien JT, Bähnisch C, Heldner S, Ohlmeyer M (2014) Effect of fiber size distribution on medium-density fiberboard properties caused by varied steaming time and temperature of defibration process. Wood Fiber Sci 46(2):175–185
- Benthien JT, Schneider M, Stehle T, Ohlmeyer M (2018) Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. Eur J Wood Prod 76(3):937–945. https://doi.org/10.1007/s00107-017-1270-z
- DIN 66165-1 (2016) Partikelgrößenanalyse—Siebanalyse—Teil 1: Grundlagen [Particle size analysis—Sieving analysis—Part 1: fundamentals], DIN German Institute for Standardization
- DIN 66165-2 (2016) Partikelgrößenanalyse—Siebanalyse—Teil 2: Durchführung [Particle size analysis—Sieving analysis—Part 2: procedure]. DIN German Institute for Standardization
- DIN EN 310 (1993) Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN 310:1993 [Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version EN 310:1993], DIN German Institute for Standardization
- DIN EN 317 (1993) Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung; Deutsche Fassung EN 317:1993 [Particleboards and fibreboards; determination of swelling in thickness after immersion in water; German version EN 317:1993], DIN German Institute for Standardization
- DIN EN 319 (1993) Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene; Deutsche Fassung EN 319:1993 [Particleboards and fibreboards; determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board; German version EN 319:1993], DIN German Institute for Standardization
- DIN EN 322 (1993) Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes; Deutsche Fassung EN 322:1993 [Wood-based panels; determination of moisture content; German version EN 322:1993], DIN German Institute for Standardization
- DIN EN 323 (1993) Holzwerkstoffe; Bestimmung der Rohdichte; Deutsche Fassung EN 323:1993 [Wood-based panels; determination of density; German version EN 323:1993], DIN German Institute for Standardization
- DIN ISO 9276-1 (2004) Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen—Teil 1: Grafische Darstellung (ISO 9276-1:1998) [Representation of results of particle size analysis—part 1: Graphical representation (ISO 9276-1:1998)]. DIN German Institute for Standardization
- Dunky M (1988) Einfluß der Spangrößenverteilung auf den Beleimungsgrad der Späne [Influence of the particle size distribution on the particles' resin content]. Holzforsch Holzverw 40:126–133
- Dunky M (1998) Particleboard size distribution and glue resin consumption: how to spare costs. In: Hague, M, Griffiths, J, Snell, T (eds) Proceedings of the second European panel products symposium, 21.–22. October 1998, Llandudno, Wales, UK, pp 206–217
- Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime—Technologie und Einflussfaktoren [Wood-based panels and adhesives—technology and influencing factors]. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (in German)
- EPF European Panel Federation (2017) Annual Report 2016–2017. Brussels
- Hänsel A, Niemz P, Wagenführ R (1988) Beziehung zwischen Struktur und Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen. Teil 3 [Relationship between structure and properties of wood and wood-based panels Part 3]. Holztechnologie 29(3):125–130 (in German)
- Hasch J (2017) Innovationen in der HWS-Industrie [Innovations in wood-based panel industry]. 5. Grecon Holzwerkstoffsymposium. Bad Homburg, Germany, 20. October 2017 (**in German**)

- Irle M, Barbu MC (2010) Wood-based panel technology. In: Thoemen H, Irle M, Sernek M (eds) Wood-based panels—an introduction for specialists. Brunel University Press, London, pp 1–94
- ISO 13322-1 (2014) Particle size analysis—Image analysis methods part 1: Static image analysis methods. ISO International Organization for Standardization
- ISO 13322-2 (2006) Particle size analysis—image analysis methods—Part 1: dynamic image analysis methods. ISO International Organization for Standardization
- Kollmann F (1966) Holzwerkstoffe—Holzspanplatten und Holzspanformlinge Rohstoffe, Herstellung, Plankosten Qualitätskontrolle usw. [Wood-based panels—Particleboards and wood particle castings, raw materials, manufacturing, target costs, quality control etc]. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York (in German)
- Niemz P, Wenk S (1989) Kenngrößen zur Beurteilung von Spangemischen und deren Meßbarkeit [Characteristic values for the evaluation of wood particle mixtures and their measurability]. Holztechnologie 30(3):117–122 (in German)
- Niemz P, Wagenführ R, Hänsel A (1988) Beziehung zwischen Struktur und Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen: Teil 1

[Relationship between structure and properties of wood and woodbased panels: part 1]. Holztechnologie 29(1):7–11 (in German)

- Plough IL (1974) The effect of running clearance on flake quality and power requirements of conical knife-ring flakers. In: Proceedings of Eighth Washington State University Symposium on Particleboard. Pullman, USA, March 1974, pp 287–300
- Seppke B, Bähnisch C, Benthien JT, Heldner S, Ohlmeyer M (2015) A concurrent skeleton-based approach for the characterization of wood fibers with sub-pixel precision for fiber board production. In: International conference on mass data analysis of images and signals (MDA). Hamburg, Germany, 11.–24. July 2015

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

Publikation V



Article

# Effects of Flat-Shaped Face Layer Particles and Core Layer Particles of Intentionally Greater Thickness on the Properties of Wood-Reduced Particleboard

# Jan T. Benthien \* and Martin Ohlmeyer \*

Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg, Germany

Correspondence: jan.benthien@thuenen.de (J.T.B.); martin.ohlmeyer@thuenen.de (M.O.);

Tel.: +49-40-73962-652 (J.T.B.); +49-40-73962-635 (M.O.)

Received: 18 May 2020; Accepted: 3 July 2020; Published: 13 July 2020



**Abstract:** Against the background of the intention to reduce the amount of wood used in the production of particleboard for economic reasons, the associated reduction in panel density and consequently the panel properties, the influence of the alternative use of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the panel properties was investigated. Appropriate particles were made for this purpose, panels with typical (650 kg/m<sup>3</sup>) and reduced wood usage (500 kg/m<sup>3</sup>) were produced, and e.g., their bending properties and internal bond strength were determined. Particle size characterization was done with sieve analysis, image analysis (length and width measurement), and manual thickness gauging. It was found that the alternative use of the flat-shaped particle significantly increased the bending properties and thus the level of the reference can be achieved despite the reduced use of wood. The reason for the increased bending properties was assumed to be the higher strength of the particles themselves and the more effective adhesive bond between the particles. The increase in internal bond strength when using alternative particles could be attributed solely the different production history (e.g., use of fresh cutting blades and laboratory scale production).

**Keywords:** particleboard; light-weight; wood reduction; particle size; particle shape; density; mechanical properties; wood chips; biomass

# 1. Introduction

One of the current focal points of research in the European wood-based panel industry is the production of particleboards with a reduced use of wood. The short-term goal of wood saving is to simply increase cost efficiency while the long-term goal is to increase material efficiency. The desire for an increase in material efficiency is based on the expected growth of the world population and consumption with limited resources at the same time, and, consequently, a shortage of the raw material (in particular raw virgin particles) for the production of particleboard. In addition to the advantages of increased material efficiency for the particleboard manufacturer, the savings set free material for other uses. The side benefit of the reduction in the use of wood is the reduction in board weight (light-weight particleboard), which may offer economic advantages for furniture manufacturers and retailers of take-away furniture. However, there is currently [1] no sign of a consumer-driven pull effect for lightweight furniture, either now or in the near future. This means that changes in production must lead to a direct cost reduction and a possible additional expense can hardly be passed on.

Boards with a lower density are obtained without changing any process parameters other than the quantity of wood. However, a decrease in board density normally results in a deterioration of the mechanical board properties: Klauditz and Stegmann [2] and Plath [3] showed this relationship for



bending strength, Keylwerth [4] for modulus of elasticity, and Liiri [5] for internal bond strength. Recent studies [6,7] confirm these interrelations. Sackey et al. [8] point out the issue of the low edge-screw withdrawal resistance of three-layer boards even without density reduction.

As each type of industrially produced board is already optimized to meet customer-specific requirements at minimal cost, typically, no further reduction of board properties is tolerable. If the quantity of wood used is to be reduced, measures have to be taken to maintain the relevant board properties at the required level. With reference to Benthien et al. [9], such measures can be classified as (a) the adjustment of particle geometry or material used (material adjustments) and (b) the adjustment of density distribution or particle orientation (structural adjustments). The result is function-optimized boards that on the one hand meet the property requirements and on the other hand are reduced in the amount of wood.

An indication of how the properties of density-reduced boards could be obtained by adjusting the particle geometry is given in an article by Wyss [10] on the patent history of particleboard. In it, Wyss describes the different approaches to board setup in the early stages (the years during and after the Second World War) of industrial particleboard production. Hereafter, a porous core layer of low-cost wood waste and face layers of specially manufactured particles characterizes the boards of one of the patent holders, Fred Fahrni. Klauditz [11] characterized these core layer particles as coarse-chunky (tearing chip), and these face layer particles as flat-thin (cutting chip) with a thickness of about 1 mm. Deppe [12] described the face layer particles used by Fahrni ("Type N") in a scale drawing, and differentiated them from large-sized wafers, strands, and an intermediate form of wafers and strands. The boards resulting from Fahrni's raw material composition showed a clearly pronounced density profile with face layers of high density (930 kg/ $m^3$ ) and corresponding load-bearing capacity and a core layer of lower density core layer (540 kg/m<sup>3</sup>) [13]. In contrast, the boards produced by the Behr–Homogenholz-Procedure (second main approach according to Wyss) also consisted of specially produced particles in the core layer, the shape of which resembled that of today's particleboard particles. The boards produced according to this approach had a compact core layer, which contributed to the strength properties of the board. From the comparison of the two approaches, it is clear that a core layer of low quality can be compensated for with the help of load-bearing face layers of special geometry particles.

Investigations on the influence of the particle geometry (size and shape) on the properties of particle-based board products are often to be found. Many of these studies, however, do not consider particleboards in the narrower sense, but rather, for example, mineral-bonded particleboards, particleboards of agricultural materials, or flakeboards made of strands. In Kollmann (ed.) [14], Teichgräber lists the geometrics of the adhesive-applied wood particles as a factor influencing the properties of particleboard and proves this with works by Turner [15], Kitahara and Kasagi [16], Post [17], and Brumbaugh [18]. Dunky and Niemz [19] compiled the results of various studies on the relationship between particle geometry and board properties in tabular form. Table 1 is a compilation of extracts from this. The results of the works listed by Teichgräber (Turner [15], Kitahara and Kasagi [16]), which are not included in the tables of Dunky and Niemz, can be summarized as follows: Maximum bending strength at a chip thickness of 0.46 mm (0.018 inches), increase in bending strength for boards with 4% adhesive content as particle length increases (Turner), and decrease in bending strength with simultaneous increase in particle length, width, and thickness (Kitahara and Kasagi).

Increased Dimension/ Board Property		Change	Source
Wood particle length			
MOR		Increase	[20,21]
MOE		Increase	[21]
IB		Minimum for medium chip length; increase sharply with shorter chips	[20]
TS		Decrease	[21]
Wood particle thicknes	ss		
MOR	(1)	Minimum for medium chip length, depending on chip length	[20]
	(2)	Decrease	[17,21,22]
	(3)	Depending on chip length, no clear correlation	[18]
MOE		Maximum for medium chip thickness	[23]
IB	(1)	Increase	[20]
	(2)	Maximum for medium chip thickness	[21]
TS	(1)	Increase	[20]
	(2)	Slight increase	[21]

**Table 1.** Influence of increasing particle dimension (length or thickness) on the properties of single-layer laboratory particleboard (based on Dunky and Niemz [19]); modulus of rupture (MOR) (bending strength), (bending) modulus of elasticity (MOE), internal bond strength (IB), and thickness swelling (TS).

Studies carried out since then investigated the effect of face and core layer particle size (as a result of applying sieves of different mesh dimensions) on three-layered test boards [24] or the effect of increasing core layer particle thickness in particular, with the focus on lightweight particleboards [9]. The results from Istek et al. [24], indicate an increase of bending strength, modulus of elasticity, and thickness swelling with increasing face layer particle size even though no statistical information is provided. In addition, in the case of the core layer particles not only the mesh width but also the mesh geometry is changed so that no statement can be made about the change in particle size. Benthien et al. [9] found that an increasing core layer particle thickness has a positive effect on internal bond strength (increase) and thickness swelling (decrease). Contrary to what could be assumed on the basis of a previous study of Benthien et al. [25], namely that large wood particles (sieve fraction: > 5 mm) have a higher compression resistance than smaller ones (sieve fraction: 1.25–3.15 mm) and, thus, support the formation of highly compacted load-bearing face layers, no increase in the bending properties was found when using thick particles as a core layer material.

The present study aims to investigate the potential of flat-shaped particles ("Fahrni-Wafer") in the face layers and, in addition, particles of intentionally greater thickness in the core layer to maintain the bending properties of typical density boards (650 kg/m<sup>3</sup>) but with reduced wood usage for board manufacture (500 kg/m<sup>3</sup>). This was done against the background of using a lower amount of wood for particleboard production and applying particles with an adapted geometry. An important part of the present study was the characterization of particle size and board structure (density profile) in order to be able to explain the effects of varied influencing variables on the board properties with the support of numerical parameters.

#### 2. Materials and Methods

## 2.1. Material

## 2.1.1. Flat-Shaped Face Layer Particle (Wafer)

By applying a disc-slicer-machine with a vertical knife disc, at the Wood Research Munich laboratory (Technical University of Munich, Munich, Germany), the flat-shaped face layer particle was made by chipping un-dried (green/forest-fresh) pinewood (*Pinus sylvestris*) board sections, which have been stored in water for several weeks before processing. The cutting of the board sections was done from shuttering boards provided by Ilim Nordic Timber GmbH & Co. KG, Wismar, Germany. The board sections of 200 mm in length, 92 mm in width, and 21 mm in thickness were fed to the

flaker's knife disc that quadratic strand-like wafers (target dimensions of 20 mm in length, 20 mm in width, and 0.5 mm in thickness) were cut from the longitudinal edge. The wafers were manually dried in a wood-drying kiln (fresh air/exhaust air) and sieve screened into "fines" and "good fraction" (mesh size 8 mm). A visual impression of the wafer material can be gained in Figure 1; the results of the chip measurement are given in Sections 3.1.2 and 3.1.3. Based on wafer, W is used in the following as an abbreviation for the flat-shaped face layer particle.



Figure 1. Exemplary shown wafers.

# 2.1.2. Lab-Made Core Layer Particle of Intentionally Greater Thickness

The core layer particle of intentionally greater thickness (with T as abbreviation) was prepared from industrial wood chips obtained from Swiss Krono sp z o.o. (Zary, Poland), mainly made of softwood (*Pinus sylvestris*), by applying an industrial-scale knife ring flaker at the Pallmann Research and Technology Center (PRTC) (Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG, Zweibrücken, Germany). A significantly larger cutting edge projection was set (1.2 mm) for chipping than is usually selected (0.8 mm) for particle production. After manufacture, the core layer particles of intentionally greater thickness were manually dried in a wood-drying kiln (fresh air/exhaust air) with a target moisture content of below 20% and further sieve fractionated into the 'good fraction' (1.5–8 mm), and the rejected 'fines' (<1.5 mm) and 'oversize' (>8 mm) fractions.

# 2.1.3. Plant-Made Face and Core Layer Particles of Typical Thickness

Already chipped, dried, and sieved, face and core layer particles for reference board manufacture (or reference layer formation) were obtained from the above-mentioned particleboard plant. For the plant-made face layer particle, FL is used as abbreviation; for the plant-made core layer particle of typical thickness, CL is used.

## 2.1.4. Adhesive, Paraffin, and Hardener

Liquid urea-formaldehyde (UF) adhesive and paraffin emulsion were obtained from the aforementioned industrial partner Swiss Krono. Ammonium nitrate ( $NH_4NO_3$ ) solution with 40% solid content was used as hardener. The solid content of the UF-adhesive was 67% while that of the paraffin emulsion was 50%.

Three-layer boards of reduced (target board density 500 kg/m<sup>3</sup>) and typical wood usage (target board density 650 kg/m<sup>3</sup>) were produced on a computer-controlled laboratory hot press without using spacer bars. The target board thickness was 16 mm. The adhesive was applied to the particles in a rotary drum blender of 400 mm in length and 310 mm in diameter (1000 mm in length and 630 mm in diameter in the case of adhesive application to the wafers), equipped with an air-atomizing spray system. Before application, 1% hardener, 1% urea (both based on the adhesive solid content), and 0.5% paraffin emulsion (based on the dry wood mass) were added in the case of the face layer material. In the case of the core layer material only the hardener (3%) was added. The amount of additional water was calculated with regard to particle moisture content and added to the aqueous adhesive solution. A target moisture content of 11% in the face layers and 8% in the core layer were calculated. The adhesive content was 11% (based on dry wood mass) in the face layers and 8% in the core layer. With regard to wood use (target board density), the relation of face-to-core layer was 35/65 (target density 650 kg/m<sup>3</sup>) or 46/54 (target density 500 kg/m<sup>3</sup>). This means that each of the face layers consists of 17.5% or 23% of the total particle mass, respectively. The change in face-to-core layer ratio was due to the reduction of the amount of glued particles in the core layer only. Where the face layers were composed of two particle types, their relation to each other was 1:1. According to wood use (target board density) and, thus, relation of face-to-core layer ratio, the particles were weighed and formed into mats on an aluminum caul plate using a 695 mm times 595 mm forming box. After removing the forming box, a second such plate was laid on the top of the mat while both were covered with siliconized paper to prevent adherence between board and caul plates.

At a press plate temperature of 200 °C, the mats were compressed with a pressing time factor of 8 s per mm (effective press time: 128 s). Closing time of the press was 6 s. Within the first 20 s after press closure, a specific pressure of 4 N/mm<sup>2</sup> was applied in order to try to achieve a thickness of 15.5 mm. During the following 100 s, the maximum specific pressure was reduced from 1.5 to 1 N/mm<sup>2</sup> while the thickness was increased to nominal board thickness (16 mm). Plate positions were kept constant for 8 s while the specific pressure was decreased further stepwise (0.5 N/mm<sup>2</sup> per step). After hot-pressing the boards were cooled down at ambient conditions and then stored in a climatic chamber at 20 °C and 65% RH before test specimen cutting.

## 2.3. Experimental Setup

A total of 21 experimental particleboards with three boards for each of the seven board types (board type (BT)) were made. As influencing parameters on the board properties, face and core layer particle type, and wood use (target board density) were varied. The experimental setup is illustrated in Table 2.

**Table 2.** Definition of board types in respect to wood usage and, thus, target density, and particle type in face and core layer. Including; plant-made face layer particle (FL), plant-made core layer particle of typical thickness (CL), wafer (W), and lab-made core layer particle of intentionally greater thickness (T).

Board Type Wood				Partic		
		Wood Usage	Target Density (kg/m <sup>3</sup> )	Face Layer	Core Layer	Layer Structure
1	(FL-CL)	Low	500	FL	CL	FL-CL-FL
2	(W-CL)	Low	500	W	CL	W-CL-W
3	(FL-T)	Low	500	FL	Т	FL-T-FL
4	(W-T)	Low	500	W	Т	W-T-W
5	(FL-W-CL)	Low	500	FL and W	CL	FL-W-CL-W-FL
6	(FL-CL)	Typical	650	FL	CL	FL-CL-FL
7	(W-CL)	Typical	650	W	CL	W-CL-W

The effect of the alternative use of flat-shaped face layer particles instead of the typical particle as face layer material was to be investigated comparing BT 2 (W-CL) with BT 1 (FL-CL), BT 4 (W-T)

with BT 3 (FL-T) in the case of low wood usage boards, and BT 7 (W-CL) with BT 6 (FL-CL) in the case of typical wood usage boards. The effect of a partial replacement of the typical face layer particle by wafers was to be investigated comparing BT 5 (FL-W-CL) with BT 1 (FL-CL) and BT 2 (W-CL).

The effect of the alternative use of the core layer particle of intentionally greater thickness instead of the typical particle as core layer material was to be investigated comparing BT 3 (FL-T) with BT 1 (FL-CL), and BT 4 (W-T) with BT 2 (W-CL).

To investigate the potential of flat-shaped particles in the face layer and the particle of intentionally greater thickness in the core layer in order to maintain the properties of low wood usage boards on the level of those of typical wood usage, the board types 2–5 (all low wood usage boards, target density of 500 kg/m<sup>3</sup>) were compared each with BT 6 (reference board of typical particles (FL and CL) and typical wood usage (target density of 650 kg/m<sup>3</sup>)).

The differences between low and typical wood usage boards were to be investigated for boards composed of the typical particle materials in face and core layer comparing BT 1 and BT 6, and for boards with flat-shaped particles as face layer material by comparison of BT 2 and BT 7. Table 3 gives an overview of the comparisons made.

The second state of the second	Compared	1	XA7 J X
Investigated Effect	Layer Structure	Board Types	- wood Usage
Alternative use of flat-shaped face layer particles	W-CL-W vs. FL-CL-FL W-T-W vs. FL-T-FL	BT 2 vs. BT 1 BT 7 vs. BT 6 BT 4 vs. BT 3	Low Typical Low
Partial replacement of the typical face layer particles	FL-W-CL-W-FL vs. FL-CL-FL	BT 5 vs. BT 1	Low
Alternative use of the core layer particle of intentionally greater thickness	FL-T-FL vs. FL-CL-FL W-T-W vs. W-CL-W	BT 3 vs. BT 1 BT 4 vs. BT 2	Low
Flat-shaped face layer particles or core layer particle of intentionally greater thickness to maintain the properties of low wood usage boards on the level of those of typical wood usage	W-CL-W, FL-T-FL, W-T-W, FL-W-CL-W-FL vs. FL-CL	BT 2, BT 3, BT 4, BT 5 vs. BT 6	Low vs. typical
Low wood usage	FL-CL-FL W-CL-W	BT 1 vs. BT 6 BT 2 vs. BT 7	Low vs. typical Low vs. typical

Table 3. Overview of the comparisons made to determine the effect of particle variation.

## 2.4. Particle Size Characterization

# 2.4.1. Sieve Analysis

The sieve analysis (DIN 66165-1:2016-8, DIN 66165-2:2016-08) was carried out with a horizontal sieve machine (AS 400 Control) from Retsch GmbH (Haan, Germany). Sieving time was 5 min with a rotation speed of 240 rpm and a mass of each sample (threefold repetition) of 40 g in the case of face layer particle and 46 g in case of core layer particles. The mesh size of the sieves used (200 mm in diameter) were selected as follows: 0.2, 0.315, 0.5, 0.63, 0.8, 1, 2, and 3.15 mm (face layer particle) and 0.8, 1, 1.6, 2, 3.15, 4, 5, 8, 11.2, and 16 mm (core layer particles).

Graphical representation of the data was performed in accordance with DIN ISO 9276-1:2004-09, using a histogram of the mass distribution density  $q_3(x)$  and mass-based cumulative distribution  $(Q_3[x])$ . For the histogram plot, each mass of particles remaining on a sieve (sieve residue) was related to the total mass (outcome: Relative share). Then, each relative mass of sieve residue was divided by

7 of 26

its size class width. The size class width was the difference between the mesh width of the upper sieve and the mesh width of the sieve containing the residue. The data basis for the cumulative distribution plot was obtained, converting the relative residues into percentages and successively summing these, starting from the smallest particle size.

The mean particle size was calculated as the sum of the product of the relative share and mean particle size of each size class. The quantile values (D10, D50 (median), and D90) were calculated by adding together the class widths (or part of them) from the smallest particle size to obtain 10% (D10), 50% (D50), or 90% (D90) of the total sieve residues. If only a part of the width of a size class was relevant, it was linearly interpolated between the mesh width of the sieve containing the residue and the mesh width of the upper sieve. As each particle type was sieve analyzed three times, the standard deviation can be used to indicate the amount of variation in the measured values. On this basis, any differences in the size (distribution) of the particle types were statistically investigated.

## 2.4.2. Image Analysis-Based Length and Width Measurement

The image-analytical length and width measurement (ISO 13322-1:2014-05, ISO 13322-2:2006-11) was realized with two different types of particle separation, but with identical techniques of image acquisition and image analysis. While the typical face layer particle was separated by means of compressed air, the core layer particles and the wafers were spread manually onto a glass sheet. For image acquisition, a transmitted light scanner (Epson Perfection V750 Pro, Epson America Inc., Long Beach, CA, USA) was applied. The resolution of the scanned images (16-bit grey scale) were 300 dpi with an image size of 254 mm times 203.2 mm, which results in a pixel edge length of 84.7  $\mu$ m. The typical face layer particles were measured three times with 0.5 g of air-conditioned (20 °C/65% RH) material for each measuring cycle. The core layer particles were also measured three times each, scattering 2 g of air-conditioned (20 °C/65% RH) material for each scan. The measurement of the wafers was carried out on 15 g adhesive-applied and air-conditioned (20 °C/65% RH) material (number of particles = 437), split on five scans. A total of at least 433 wafers were included in the evaluation.

For image processing, the software FibreBench (Hamburg University, Department of Informatics, Scene analysis and visualization, Hamburg, Germany, Version 1.7, Revision 1901) [26] was used. The algorithm of flowline tracing [27] was switched off, so that the particle dimensions were only determined by the image moment method (rectangular model). In addition to length and width measurement, the number of pixels assigned by the algorithm as particle can be counted and the projection area derived from it.

Graphical representation of the length and width measurement data was conducted in accordance with DIN ISO 9276-1, yielding a histogram of both the length and width distribution density  $q_1(x)$ , as well as the length- and width-based cumulative distribution ( $Q_1[x]$ ). In contrast to the number distribution, where the frequency of the measured characteristic (e.g., length or width) is plotted over the length or width classes, in the case of the dimension distribution the sum of the measured characteristic (e.g., length or width) of each length or width class is plotted over the length or width classes. The procedure for data processing (i.e., setting the proportion of each size class in relation to the sum of the measured characteristic, dividing this value by the size class width, further preparing the plot, and producing the plot itself) is similar to the graphical representation of the sieve analysis results.

The width of the first length class was set to 0.5 mm. With increasing particle length, the width of the length classes was logarithmically increased. Therefore, the upper bin limits were 0.5, 0.7, 0.98, 1.37, 1.92, 2.69, 3.76, 5.27, 7.38, 10.33, 14.46, 20.25, 28.35, 39.69, and 55.56 mm. The upper limits of the width classes were 0.5, 0.7, 0.98, 1.37, 1.92, 2.69, 3.76, 5.27, and 7.38 mm. As only particles longer than 1 mm were evaluated, the first bin of the length distributions containing data was 0.98–1.37 mm. The mean particle length was calculated by dividing the sum of all particle lengths by their count. Then, the 10% quantile (D10 or x10), 50% quantile (D50 or x50), and 90% quantile (D90 or x90) of the length-based cumulative distribution were calculated. D50 represents the median of the length-sorted raw data set. The same specific values were calculated for the width measurement. As further characteristic values,

the number of particles found per particle sample (sum of the replicate measurements) and the length (width) of the longest (widest) particle of each particle type (mean of the three replicate measurements) were given.

As each particle type was measured three times, the standard deviation can be used to indicate the amount of variation in the measured values. On this basis, any differences in the length and width of the particle types were statistically investigated.

## 2.4.3. Manual Thickness Gauging

The core layer particle thickness was measured manually with a caliper on 45 particles from each particle type. The particles were taken from the image analysis samples, with 15 particles for each measurement. The selection of the particles was made on the basis of their manageability, but at the expense of representativeness.

The wafer thickness was measured manually applying dial gauge with a round contact point at the end of the spindle. Due to the limited handling of the wafer at the manual thickness measurement, only 388 of the image analytically analyzed wafers were measured.

## 2.5. Specimen Preparation and Testing Procedure

Prior to cutting test specimens, boards were trimmed to a size of 500 mm times 400 mm. With respect to the number of replicates for each board type (n = 3), the number of test specimens for each board type was as follows:

- 12 (4 × 3) for measuring bending strength (modulus of rupture (MOR)) and bending modulus (modulus of elasticity (MOE)) according to DIN EN 310:1993-08,
- 24  $(8 \times 3)$  for measuring internal bond strength (IB) according to DIN EN 319:1993-08,
- 15 (5 × 3) for measuring the swelling in thickness after immersion in water (thickness swelling = TS) according to DIN EN 317:1993-08, and
- 9  $(3 \times 3)$  for measuring the density profile.

The swelling in thickness was determined after 2 h and 24 h of immersion in water (TS 2 h and TS 24 h, respectively). Simultaneous to the swelling in thickness, the increase of mass after immersion in water was determined. The mass of absorbed water is expressed as a percentage of the initial test specimen weight and designated as water absorption (WA). The gravimetric specimen density was determined according to EN 323:1993-08. Prior to testing, test specimens were conditioned at 20 °C and 65% RH until a constant mass was reached.

Density profiles were measured on the basis of the radiometric principle applying the measuring instrument Dax 6000 (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld, Germany). The chosen measuring speed was 0.25 mm/s. Beginning from the boards' bottom side (from pressing), the test specimens were scanned stepwise (step size 0.02 mm) and the density for each scan spot determined. The obtained data sets (scan spot position and density) were transferred to a consistent board thickness of 16 mm and the mean density profile for each board type was calculated and plotted. On the basis of the transferred data set, the maximum density of each upper and lower side face layer, the minimum density (in the core layer), and the mean (radiometric) test specimen density were calculated. After checking statistically for equality of the upper and lower surface layer density, the mean face layer density was calculated. Following the principals of quantitative density profile evaluation of Jensen and Kehr [28], the ratio of the mean face layer density to core layer density (density gradient) was calculated.

To investigate whether the target thickness was achieved on the one hand and the target density on the other hand, the test specimens for the determination of bending properties (n = 12), internal bond strength (n = 24), and swelling in thickness (n = 15) of one board type were used (in sum n = 51). The same database was used to examine for differences in thickness and density between the plate types.

#### 2.6. Statistical Analysis

The majority of statistical analyses were conducted by applying the analysis tool JMP from SAS Institute (Cary, NC, USA). For data preparation, common statistical characteristics calculation (e.g., mean value, standard deviation, coefficient of variance, and quantiles), and many graphics creation, Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, DC, USA) was applied. Furthermore, Microsoft Excel was used to identify extreme outliers. Histogram and density profile plotting was done with Matlab (MathWorks, Inc., Natick, MA, USA).

Each dataset was checked for extreme outliers by applying the interquartile range (IQR) method; with IQR is the difference between the third quartile ( $Q_3$  or 75%-quantile) and the first quartile ( $Q_1$  or 25%-quantile). As the lower criterion for the definition as an extreme outlier the first quartile minus the triple IQR ( $Q_1 - 3$  IQR); as the upper criterion the third quartile plus the triple IQR ( $Q_3 + 3$  IQR) was defined. In case of a detected extreme outlier, all data available for this test specimen were excluded from the evaluation.

For the selection of suitable test methods for further statistical data analysis (testing for differences in mean values, comparison of a mean value against a target value), the adjusted data of each set of test specimens (sample) were examined for normal distribution using the Shapiro–Wilk-Test at a significance level of  $\alpha = 0.01$ . Data from normally distributed samples to be compared were further examined for homogeneity of variance applying the Levene-Test at a significance level of  $\alpha = 0.05$ .

Normally distributed samples for which homogeneity of variance exists were tested for any statistically significant differences using the two-sample *t*-Test (k = 2) or the *F*-Test (k > 2) at a significance level of  $\alpha = 0.05$ . Normally distributed samples for which there is no homogeneity of variance were investigated using the Welch-Test at the same significance level. If normal distribution was not available for all samples, the Mann–Whitney-Test (k = 2) or the Kuskal–Wallis-Test (k > 2) was applied at the significance level mentioned above. In the case of a sample number greater than two, a post hoc analysis was carried out at a significance level of  $\alpha = 0.05$  to determine which samples differed from each other. The Tukey-Test or Tukey–Kramer-Test was used following the *F*-Test for balanced and unbalanced samples, respectively. The Games–Howell-Test was applied subsequent to the Welch-Test (normally distributed samples, no homogeneity of variance). In case of non-normally distributed samples, the Steel–Dwass-Test was used following the Kuskal–Wallis-Test. The results of the post hoc analysis were given in the form of homogeneous groups (HG) indicating statistical distinctiveness by different letters. The procedure of test selection is illustrated in Figure 2.

Normal distributed samples were tested for equality with a target value using the one-sample *t*-Test and non-normal distributed samples were tested using the Wilcoxon-Test, both at a significance level of  $\alpha = 0.05$ . The relative difference of a measured quantity to a target was calculated in accordance with Equation (1):

Relative difference to target = ((Measured value – Target value)/Target value)  $\times 100\%$ , (1)





# 2.7. Shift of Data to Targeted Board Density

With the intention of comparing the properties of the different board types independent of the actually achieved density that naturally deviates to a certain extent from the intended one, the data were shifted, each, to the targeted density of 500 kg/m<sup>3</sup> or 650 kg/m<sup>3</sup>, respectively. The data shift was performed based on the slope of the linear regression line through the data points of the property and density previously calculated, following Equation (2):

Shifted property = 
$$((Target density - Achieved density) \times Slope) + Property,$$
 (2)

# 3. Results

# 3.1. Particle Size Characterization

# 3.1.1. Sieve Analysis

The data sets were free of extreme outliers (IQR-Method) and normally distributed (Shapiro–Wilk-Test). The Levene-Test showed the presence of variance homogeneity across the (plant-made) core layer particle of typical thickness and the (lab-made) core layer particle of intentionally greater thickness (T) for each of the characteristic values. Consequently, the two-sample *t*-Test was used to check whether there are significant differences between them.

The results of sieve-analyzing the (plant-made) face and core layer particles and the (lab-made) core layer particle of intentionally greater thickness are graphically prepared in Figure 3. Table 4 shows the characteristic values and their fluctuation range as well as the results of the statistical mean value comparison for the two core layer particles.



**Figure 3.** Histogram (blue columns) of the density distribution (primary *x*-axis) and line chart of the cumulative distribution (secondary *x*-axis) of the particle size distribution of the different particle types (FL, CL, and T, where CL and T have the same axis scales) obtained by sieve analysis.

**Table 4.** Characteristic values of the particle size distribution after sieve analysis and their coefficient of variance (in brackets) over the repeat measurements with results (homogeneous groups, indicated by letters) of statistical mean value comparison for the core layer particles CL and T. (MV = mean value, D10 = 10% quantile, D50 = 50% quantile, and D90 = 90% quantile).

Particle Material	MV (mm)	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)
FL	0.8 (4%) -	0.3 (3%) -	0.7 (5%) -	1.4 (4%) -
CL	2.8 (5%) A	1.1 (6%) A	2.4 (7%) A	5.1 (3%) A
T	2.4 (5%) B	1.0 (7%) A	2.1 (6%) A	4.1 (6%) B

Based on the statistical comparison of the characteristic values, it can be concluded that the particle size of CL exceeds that of T in the case of two characteristic values (mean value (MV) and D90). In the case of D10 and D50 the particle size of CL exceeds that of T, only nominally, but is not statistically significant. This can be visualized by comparing the height of the histogram bars of certain particle size ranges. The histogram bar of the size class 1.6 to 2 mm of CL is lower than that of T, while the histogram bar of the size class 5 to 8 mm of T is lower than that of CL. In sum, this means that the particle size of the plant-made core layer particle of typical thickness exceeds that of the lab-made core layer particle of intentionally greater thickness.

The different scaling of the abscissa axis shows the differences in particle size between face layer particle (mean particle size 0.8 mm) and core layer particles (mean particle size 2.4 (T) and 2.8 mm (CL)).

#### 3.1.2. Image Analysis-Based Length and Width Measurement

## Measuring of FL, CL and T

The data sets were free of extreme outliers (IQR-Method) and normally distributed (Shapiro–Wilk-Test). Apart from the maximum particle width, the Leneve-Test showed the presence of variance homogeneity across board types for each of the other characteristic values. Consequently, both the two-sample *t*-Test and the Welch-Test were used to check whether there are significant differences in the characteristic values between the board types.

The image analysis results of the (plant-made) face layer particle, the plant-made core layer particle of typical thickness, and the lab-made core layer particle of intentionally greater thickness are graphically prepared in Figure 4. Table 5 shows the characteristic values for particle length and width, as well as the results of the statistical mean value comparison of the two core layer particles.



**Figure 4.** Histogram (blue columns) of the density distribution (primary *x*-axis) and line chart of the cumulative distribution (secondary *x*-axis) of the particle length and width distribution of the different particle types (FL, CL, and T, where CL and T have the same axis scales) obtained by image analysis.

**Table 5.** Characteristic values of the particle length and width distribution after image analysis and their coefficient of variance (in brackets) over the repeat measurements with results (homogeneous groups, indicated by letters, upper case for length and lower case for width) of statistical mean value comparison for the core layer particles CL and T. (D10 = 10% quantile, D50 = 50% quantile, D90 = 90% quantile, and Max = maximum).

Particle Dimension/ Particle Type	MV (mm)	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)	Max (mm)
Length					
FL	1.7 (3%) -	1.1 (1%) -	1.5 (4%) -	2.7 (4%) -	10.9 (16%) -
CL	9.5 (15%) A	3.2 (13%) A	7.9 (19%) A	17.7 (13%) A	41.9 (27%) A
Т	6.6 (7%) B	2.4 (10%) B	5.4 (8%) A	11.9 (8%) B	38.7 (25%) A
Width					
FL	0.6 (4%) -	0.3 (3%) -	0.6 (5%) -	1.1 (4%) -	4.0 (6%) -
CL	2.0 (12%) a	0.6 (36%) a	1.8 (12%) a	3.6 (14%) a	13.2 (27%) a
Т	1.7 (7%) a	0.5 (45%) a	1.5 (3%) a	2.9 (10%) a	9.5 (4%) a

The characteristic values mainly show that the length of the reference particle (CL) is significantly higher than that of the core layer particle of intentionally greater thickness. In the case of the width measurement, no differences were to be observed between the plant-made (CL) and the lab-made (T) core layer particle. The results from image analysis show that the two core layer particles differ mainly in length where even the reference core layer particle is larger than that of intentionally greater thickness.

This can be visualized by comparing the height of the histogram bars of certain particle size ranges. The histogram bars of the length size classes smaller than 7.38 mm of CL are smaller than that of T, while the histogram bars of the length size classes larger than 10.33 mm of CL are larger than that of T. The histogram bars of the width size classes smaller than 1.37 mm of CL are larger than that of T, while the histogram bars of the width size classes larger than 1.92 mm of CL are smaller than that of T.

The different scaling of the abscissa axis shows the differences in particle length and width between the face layer particle (mean particle length 1.7 mm, and width 0.6 mm) and the core layer particles (mean particle length 6.6 (T) and 9.5 mm (CL), and width 1.7 mm (T) and 2.0 mm (CL)).

#### Measuring of W

Mean wafer length was determined to a value of 23.3 mm with a coefficient of variance (CV) of 27%; the mean width was 9.2 mm with a CV of 56%. The variance of wafer dimensions is illustrated in Figure 5 by means of box-whisker-plots with standard deviation ( $\pm$ 6.2 mm (length),  $\pm$ 5.1 mm (width)) as box and minimal and maximal values (10.7 and 49.9 mm (length), 1.6 and 26.4 mm (width)) as whiskers. The deviation of the mean wafer length from the target of 20 mm and the fluctuation range of the measured values can be explained by the partially improper adjustment of the scoring blades. The width of the wafers fell below the target value of 20 mm due to unintentional but unavoidable resizing in the course of drying and screening. The breaking of the wafers parallel to the fiber is related to the particle width and especially the particle thickness.



**Figure 5.** Size distributions in length, width, and thickness of wafers in form of box-whisker-plots, where the mean as horizontal line, the standard deviation as a box, and minimum and maximum values as whiskers (length and width measurement n = 433; thickness measurement n = 388).

## 3.1.3. Manual Thickness Gauging

A value of 1.5 mm (SD:  $\pm$  0.5 mm, CV: 36%) in the case of the (plant-made) core layer particle of typical thickness and 1.4 mm (SD:  $\pm$  0.4 mm, CV: 30%) in the case of the (lab-made) core layer particle of intentionally greater thickness was calculated as the average thickness of 45 particles each. This means that the thickness of CL nominally exceeds that of T, but practically does not differ from it. Consequently, in the later investigation of the influence of core layer particle variation on the board properties, not the effect of thickness is examined, but rather the effect of a varied particle production procedure. In contrast to industrial particle production, it can be assumed that fresh cutting blades, a careful drying, and a more thorough screening were applied.

The thickness of the flat-shaped face layer particles (W) was calculated to a value of 0.5 mm (SD:  $\pm$  0.1 mm, CV: 22%) as an average of 388 particles. The variance in wafer thickness is shown in Figure 5 using a box-whisker-plot with the standard deviation as a box and the minimum and maximum value (0.3 and 1.0 mm) as whiskers. The wafer thickness probably varies due to variation of the contact pressure of the board sections against the knife disc.

#### 3.2. Board Properties

## 3.2.1. Test Specimen Thickness and Density

The data sets were free of extreme outliers (IQR-Method). Missing normal distribution was found for BT 3 (for thickness and density both) and BT 7 (only for thickness) (Shapiro–Wilk-Test). Consequently, both the one-sample *t*-Test and the Wilcoxon-Test were used to check whether target thickness and density were achieved for each board type; the Kruskal–Wallis-Test was used to check whether there are significant differences in thickness and density between the board types. For the post hoc analysis the Steel–Dwass-Test was to be used.

The results of determining the test specimen thickness and density, checking for achievement of target thickness and density, and testing for significant differences in thickness and density between the board types are summarized in Table 6.

The average test specimen thickness of the board types was between 15.7 and 16.5 mm nominal, which means that the relative difference between the thickness actually achieved and the target thickness (16 mm) was at most 3%. With the exception of BT 6 (FL-CL-FL), the test specimen thickness achieved differed significantly from that intended. Further on, significant differences in mean test specimen thickness were found between the board types. This means that the board thickness achieved at constant pressing conditions is dependent on the particles used. Conversely, this means that the pressing parameters have to be adapted to the particles if a uniform board thickness is to be achieved.

Depending on the targeted density of the boards (500 or 650 kg/m<sup>3</sup>), the average test specimen density was between 492 and 510 kg/m<sup>3</sup> or 631 and 647 kg/m<sup>3</sup>, respectively. This means that the relative difference between the density actually achieved and the target density was a maximum of 3%. The density of the test specimens differed significantly from the intended density in three of the seven board types, and in the case of four of the seven board types no statistically significant difference was found. Further on, significant differences in test specimen density were found between the board types. This applies across all board types, but also within the respective density levels.

Since the test specimen mass and the test specimen dimensions determine its density, the particles weight as well as the forming box have not been changed for board production, and the test specimen density does not correlate with the test specimen thickness, a lateral yielding of the particle mat during pressing can be assumed in addition to the particle-specific spring back in board thickness after leaving the press.

The comparison of the gravimetrically and radiometrically determined test specimen density shows that, in principle, comparable values were achieved, whereas the radiometrically determined values, however, were basically lower (-4.4% maximum in the case of BT 5) than the gravimetrically determined values.

**Table 6.** Statistical characteristic values (MV, coefficient of variance (CV)) of the sample thickness, gravimetrically determined sample density (both n = 51), and radiometrically determined sample density ( $n = 7 \dots 9$ ), results (homogeneous group (HG), indicated by letters) of statistical mean value comparison, results of statistical testing for achievement of target thickness and density, and information on the relative difference between target and actual value.

				Sample Thickness (mm)				Sample Density (kg/m <sup>3</sup> )					
Board Type		Wood Usage	Target Density (kg/m <sup>3</sup> )	·····			Gravimetric Determination			Ra Dete	Radiometric Determination		
				MV (CV) HG	Different from Target	Relative Difference to Target	MV (CV) HG	Different from Target	Relative Difference to Target	n	MV (CV)		
1	(FL-CL)	Low	500	16.1 (1%) C	Yes	0%	497 (3%) DE	No	-1%	8	492 (4%)		
2	(W-CL)	Low	500	16.5 (1%) A	Yes	3%	492 (2%) E	Yes	-2%	9	470 (5%)		
3	(FL-T)	Low	500	15.7 (2%) D	Yes	-2%	510 (5%) C	Yes	2%	9	496 (7%)		
4	(W-T)	Low	500	16.2 (1%) B	Yes	2%	504 (3%) CD	No	1%	8	491 (3%)		
5	(FL-W-CL)	Low	500	15.8 (2%) D	Yes	-1%	505 (2%) CD	Yes	1%	9	483 (4%)		
6	(FL-CL)	Typical	650	15.9 (3%) D	No	-1%	647 (3%) A	No	0%	9	641 (3%)		
7	(W-CL)	Typical	650	16.5 (1%) A	Yes	3%	631 (2%) B	Yes	-3%	7	603 (3%)		

#### 3.2.2. Density Profile

According to the set rules (IQR method) extreme outliers were found in the case of BT 1 (maximum lower face layer density, one test specimen), BT 4 (maximum lower face layer density and core layer density, one test specimen each), and BT 7 (maximum lower face layer density, two test specimens). All data were normally distributed (Shapiro–Wilk-Test).

The Levene-Test has shown for all board types that the variances of upper face layer density and lower face layer density are homogeneous. The corresponding two-sample *t*-Test to be applied subsequently showed that the density of the upper face layer and the lower face layer are statistically equal. This shows that the density profiles are symmetrical and therefore the mean value over both face layer densities can be used for further analysis.

No homogeneity of variances was found for both the mean face layer and the core layer density across the board types (Levene-Test). Consequently, the Welch-Test was used to check whether there are significant differences between the board types in terms of mean face layer and the core layer density. The Games–Howell-Test was used for the subsequent post hoc analysis.

The density profiles of the investigated board types are shown in Figure 6a–f, combined in different ways depending on the partial investigation. Table 7 lists the characteristic values of the density profiles: Maximal face layer density, upper and lower side each, as well as the average of upper and lower side maximal density, and the minimal density in the core layer. In addition, the results of the statistical analyses with regard to differences between the board types in terms of face and core layer density, and the density gradient can be found.



**Figure 6.** Average density profiles of the seven board types (BT 1–7) investigated, variously arranged (**a**–**f**). The scans were started at the board lower side (from pressing).

# Fibers 2020, 8, 46

Board Type			Target Density (kg/m <sup>3</sup> )	n	Ma	ximum Density (	Minimum Core		
		Wood Usage			Upper Face Layer MV (CV)	Lower Face Layer MV (CV)	Face Layers Mean Value MV (CV) HG	Layer Density (kg/m <sup>3</sup> ) MV (CV) HG	Density Gradient (-)
1	(FL-CL)	Low	500	8	615 (6%)	642 (5%)	628 (5%) CD	407 (3%) C	1.55
2	(W-CL)	Low	500	9	543 (5%)	551 (6%)	547 (6%) E	427 (6%) BC	1.28
3	(FL-T)	Low	500	9	640 (8%)	656 (10%)	648 (9%) CD	402 (7%) BC	1.61
4	(W-T)	Low	500	8	597 (4%)	607 (4%)	602 (4%) D	431 (3%) BC	1.40
5	(FL-W-CL)	Low	500	9	640 (7%)	665 (7%)	653 (7%) C	417 (4%) BC	1.57
6	(FL-CL)	Typical	650	9	940 (4%)	932 (5%)	936 (4%) A	520 (2%) A	1.80
7	(W-CL)	Typical	650	7	827 (3%)	828 (2%)	828 (2%) B	519 (4%) A	1.60

**Table 7.** Statistical characteristic values (MV, CV) of the radiometrically determined maximal face and minimal core layer sample density, results (HG, indicated by letters) of statistical mean value comparison, and specification of the density gradient.

It is to be seen from Figure 6a that a reduction of wood usage for board manufacture, and, thus, reduction of board density, results in a clear reduction of the pronouncedness of the density profile as well as significant less density face layers and a less density core layer. This applies to both, boards composed of typical particles (BT 6 vs. BT 1) and those with wafers as face layer material (BT 7 vs. BT 2). The decrease in pronouncedness can be traced by the decreasing density gradient each and the results from statistical analysis.

Comparing BT 1 (FL-CL) with BT 2 (W-CL), BT 6 (FL-CL) with BT 7 (W-CL) (both Figure 6a), and BT 4 (W-T) with BT 3 (FL-T) (Figure 6b) it is to be seen that the pronouncedness of the density profile decreases if flat-shaped particles are applied as face layer material. This can be traced by decreasing density gradients each, even though the results of the statistical analysis are not comparably clear. In contrast to a complete replacement of the typical face layer particle by wafers, a partial replacement does not result in a density profile that can be regarded as a mixture of both, but rather in a more pronounced density profile with highly compacted face layers (Figure 6c).

The effect of the alternative use of the particle of intentionally greater thickness instead of a typical one as core layer material of low wood usage boards is to be studied comparing the density profiles of BT 1 (FL-CL) with that of BT 3 (FL-T) in Figure 6d and that of BT 2 (W-CL) with that of BT 4 (W-T) in Figure 6e. This can be traced by decreasing density gradients each, even though the results of the statistical analysis are not comparably clear.

Comparing the density profiles of the low wood usage boards (board types two to five) with that of the reference of typical density and particle composition (BT 6 (FL-CL)) it can be seen that they are all much less pronounced (Figure 6f) than that of the reference. This can be traced by different density gradients and the results of the statistical analysis.

## 3.2.3. Bending Properties

The data sets under consideration were free of extreme outliers (IQR-Method) and normally distributed (Shapiro–Wilk-Test). No homogeneity of variances was found for both MOR and MOE across the board types (Levene-Test). Consequently, the Welch-Test was used to check whether there are significant differences between the board types in terms of MOR and MOE. The Games–Howell-Test was used for the subsequent post hoc analysis.

After shifting the data no further extreme outliers were found, and the data sets were still normally distributed. As no homogeneity of variances was found, the shifted data sets were checked for significant differences applying the Welch-Test. For the subsequent post hoc analysis the Games–Howell-Test was used.

Table 8 shows mean value and coefficient of variance for the bending properties of the board types (measured data above, shifted data below) and each the results of analysis for significant differences between them. A graphical comparison of the measured values is shown in Figure 7.

## Fibers 2020, 8, 46

Data Set Used/ Board Type		Wood Usage	Target Density (kg/m <sup>3</sup> )	Bending Properties			Thickness Swelling		Water Absorption	
				MOR (N/mm <sup>2</sup> )	MOE (N/mm <sup>2</sup> )	IB (N/mm <sup>2</sup> )	2 h (%)	24 h (%)	2 h (%)	24 h (%)
Meas	ured data									
1	(FL-CL)	Low	500	5.9 (9%) F	1200 (6%) F	0.29 (11%) E	10.0 (6%) C	13.2 (5%) E	80.8 (7%) BC	101.9 (5%) BC
2	(W-CL)	Low	500	13.0 (12%) C	2360 (4%) C	0.33 (7%) D	11.1 (9%) BC	14.9 (7%) CD	89.2 (4%) A	110.3 (3%) A
3	(FL-T)	Low	500	7.0 (15%) E	1396 (11%) E	0.40 (9%) C	9.1 (9%) D	14.3 (6%) DE	75.4 (9%) CD	100.2 (3%) C
4	(W-T)	Low	500	15.0 (11%) B	2700 (4%) B	0.43 (9%) B	11.0 (7%) B	15.5 (6%) C	85.4 (5%) AB	104.4 (3%) BC
5	(FL-W-CL)	Low	500	9.3 (11%) D	1887 (4%) D	0.33 (8%) D	10.7 (8%) BC	14.0 (8%) DE	87.0 (6%) A	104.9 (4%) B
6	(FL-CL)	Typical	650	14.4 (9%) B	2763 (9%) B	0.55 (9%) A	11.7 (6%) B	18.9 (6%) B	65.7 (9%) E	83.7 (6%) D
7	(W-CL)	Typical	650	21.6 (7%) A	3737 (3%) A	0.54 (9%) A	15.2 (6%) A	22.6 (7%) A	74.7 (3%) D	87.4 (3%) D
Shifted data										
1	(FL-CL)	Low	500	5.9 (6%) g	1187 (2%) g	0.30 (7%) g	9.9 (4%) de	13.3 (3%) e	79.7 (5%) b	101.4 (3%) c
2	(W-CL)	Low	500	14.8 (6%) b	2474 (3%) d	0.34 (5%) e	11.3 (8%) bc	15.2 (7%) c	87.9 (3%) a	108.7 (1%) a
3	(FL-T)	Low	500	6.3 (9%) f	1284 (3%) f	0.39 (6%) d	9.1 (9%) e	13.9 (3%) d	77.3 (8%) b	101.2 (3%) c
4	(W-T)	Low	500	13.8 (6%) d	2621 (3%) c	0.42 (5%) c	10.9 (7%) bc	15.2 (3%) c	85.8 (5%) a	104.9 (3%) b
5	(FL-W-CL)	Low	500	9.3 (11%) e	1886 (4%) e	0.33 (7%) f	10.6 (8%) cd	13.8 (7%) d	87.5 (4%) a	105.8 (2%) b
6	(FL-CL)	Typical	650	14.3 (5%) c	2737 (2%) b	0.55 (7%) b	11.7 (6%) b	19.1 (4%) b	64.4 (3%) d	82.6 (2%) e
7	(W-CL)	Typical	650	22.7 (6%) a	3867 (2%) a	0.58 (6%) a	15.5 (6%) a	23.6 (5%) a	72.1 (1%) c	84.8 (1%) d

**Table 8.** Statistical characteristic values (mean value (coefficient of variance)) of the measured and shifted board properties, and results (homogeneous groups, indicated by letters) of the statistical mean value comparison each, measured data (upper case letters), and shifted data (lower case letters).



**Figure 7.** Properties of wood-reduced (target density 500 kg/m<sup>3</sup>) and typical wood usage (650 kg/m<sup>3</sup>) boards composed of different FL, CL, W, T, MOR, MOE, IB, TS, and water absorption (WA); error bars indicate standard deviation.

The bending properties of board of reduced wood usage were found to be significantly below them of typical wood usage, regardless of the applied particle for manufacture (comparing BT 1 with BT 6 and BT 2 with BT 7). An uncompensated reduction in the amount of wood used for board manufacture therefore leads to a reduction in bending properties. As an explanation for the reduced bending properties, the results of the density profile determination and the internal bond strength determination can be used. The density profiles show that the density of the face layers, in particular, are reduced with reduced wood use. This means that there is less substance available to absorb the tensile and compressive forces resulting from bending loads. Furthermore, a lower compression of the wood substance during board manufacture leads to smaller contact surfaces between the particles and, thus, to lower bonding quality. This is at least indicated by the reduction in internal bond strengths with reduced core layer density (see next chapter).

The alternative use of wafers instead of the typical face layer particle leads to a significant increase of bending properties (bending strength and modulus of elasticity). That applies to both, boards of typical wood usage (BT 7 (W-CL) vs. BT 6 (FL-CL)) and those of low wood usage (BT 2 (W-CL) vs. BT 1 (FL-CL) and BT 4 (W-T) vs. BT 3 (FL-T)) for manufacture. The increase of MOR due to the alternative use of W amounts to 120% in the case of boards of low wood usage, and 114% in the case of boards of typical wood usage. In the case of MOE, the increase amounts to 97% and 93% respectively. Including BT 5 with partly substituted face layer particles into the first of the second comparison (BT 2 (W-CL) vs. BT 1 (FL-CL)) a row of significant increasing bending properties (BT 1 < BT 5 < BT 2) with increasing substitution (no, partly, complete) of face layer particle is obtained. The alternative use of wafers as face layer material can therefore serve as a measure to compensate for a reduction in bending properties when the amount of wood used for board production is reduced. The explanation for the improved bending properties is the different nature of the particle, since the previously mentioned positive effect of an increased face layer density on the bending properties is not observed here. Rather, an increase in bending properties can be observed despite a decreasing face layer density. It can therefore be

assumed that the different nature of the particle means that the face layers can absorb the tensile and compressive forces resulting from bending loads to a greater extent.

The use of the core layer particle of intentionally greater thickness for board manufacture leads to a small but significant increase in bending properties compared to the respective reference (BT 3 (FL-T) vs. BT 1 (FL-CL) and BT 4 (W-CL) vs. BT 2 (W-T)). When considering the board properties after adjusting for the density influence (Table 7, shifted data), however, it can be seen that the gradation of the board types reverses (MOR, BT 4 vs. BT 2) or the difference between the measured values becomes smaller (MOR, BT 3 vs. BT 1 and MOE both pairings). Comparing each of the low wood usage boards (board types two to five) with the reference of typical wood usage composed of typical wood particles (BT 6) it is to be seen that the combined use of flat-shaped face layer particles and the core layer particle of intentionally greater thickness (BT 4) enables to reach the bending properties of the reference although the use of wood has been reduced by 150 kg/m<sup>3</sup> (no significant differences in properties). When considering the bending properties after elimination of the influence of density (Table 7, shifted data), BT 2 reaches or, more precisely, exceeds the bending strength of the reference (BT 6) significantly. Regardless of statistical significance, the bending properties of both BT 2 and BT 4 reach the level of BT 6 after elimination of the influence of density.

The supplementary consideration of the shifted data shows, in contrast to the measured data, that the variation of the core layer particle has no influence on the bending properties.

#### 3.2.4. Internal Bond Strength

According to the set rules (IQR method) extreme outliers were found in the case of BT 1 (sample density, two test specimens). All data were normally distributed (Shapiro–Wilk-Test). The Levene-Test showed the presence of variance homogeneity across the board types. Consequently, the Welch-Test was used to check whether there are significant differences between the board types. The Games–Howell-Test was used for the subsequent post hoc analysis.

After shifting the data no further extreme outliers were found and the data sets were still normally distributed. As no homogeneity of variances was found, the shifted data sets were checked for significant differences applying the Welch-Test. For the subsequent post hoc analysis the Games–Howell-Test was used.

The results of IB determination (mean value, coefficient of variation) and the results of analysis for significant differences between them are listed in Table 7 (measured data above, shifted data below). A graphical comparison of the measured values is shown in Figure 7.

The internal bond strength was found to be significant different for boards of low and typical wood usage, regardless of the applied particles for manufacture (comparing the board types one to five with the board types six and seven). This can be explained by the results of the density profile determination (Figure 6a,f). For boards of low wood usage, a much lower core layer density than for boards of typical wood usage was found. This means a lower compression of the wood substance, smaller contact surfaces between the particles, and, thus, to lower bonding.

The use of wafers instead of the typical particle as face layer material leads to a small but still significant increase of IB comparing BT 2 (W-CL) with BT 1 (FL-CL) and BT 4 (W-T) with BT 3 (FL-T) (all low wood usage boards (500 kg/m<sup>3</sup>)). One approach to explain this could be the nominally increased core layer density, which in turn could be explained by changed compaction behaviors due to the changed particle type insert. The increase of internal bond strength due to the replacement of the typical face layer particle by flat-shaped ones was found to be equal, regardless of whether the face layer particles were replaced completely or partially (IB of BT 5 equates that of BT 2).

The alternative use of the core layer particle of intentionally greater thickness leads to a significant increase of internal bond strength (BT 3 (FL-T) vs. BT 1 (FL-CL) and BT 4 (W-T) vs. BT 2 (W-CL)) (all low wood usage boards (500 kg/m<sup>3</sup>)). The increase of internal bond strength amounts 38% in the case of boards with typical particles as face layer material, and 30% in the case of boards with wafers as face layer material. As no differences in core layer particles thickness were found, the increase

of internal bond strength can be explained by the difference in particle production. While the core layer particle CL was produced on industrial scale, fresh cutting blades, a careful drying and a more thorough screening were applied in the case core layer particle T, which obviously results in a better bond between the particles.

The comparison of the internal bond strength of the low wood usage board (board types two to five, 500 kg/m<sup>3</sup>) with that of the typical wood usage reference (BT 6) shows that neither the use of wafers as face layer material nor the use of the core layer particle of intentionally greater thickness was able to maintain the properties of wood-reduced boards on the level of those of typical wood usage ones.

# 3.2.5. Thickness Swelling

According to the set rules (IQR method) one extreme outlier was found in the case of BT 1 (TS 2 h). Furthermore, the data from one test specimen of BT 3 were excluded from the evaluation, as this was recognized as an outlier when considering the water absorption. Missing normal distribution was found for TS 2 h data of BT 1 (Shapiro–Wilk-Test). The Leneve-Test was therefore applied only for TS 24h data and showed variance homogeneity as a result. According to the findings, either the Kruskal–Wallis-Test (TS 2 h) or the *F*-Test (TS 24 h) was applied to test for any significant differences in terms of thickness swelling between the board types. The Steel–Dwass-Test (TS 2 h) or the Tukey–Kramer-Test (TS 24 h) was used for subsequent post hoc analysis.

After shifting the data additional extreme outliers to those already sorted out were found and also sorted out (BT 1, TS 2 h, one test specimen). Except for BT 1, TS 2 h, all data were still normally distributed. For the corresponding data set to be examined (TS 24 h), no homogeneity of variances was found. According to the preconditions, the shifted data sets were checked for significant differences applying the Kruskal–Wallis-Test (TS 2 h) or the Welch-Test (TS 24 h). For the subsequent post hoc analysis the Steel–Dwass-Test (TS 2 h) or the Games–Howell-Test (TS 24 h) was used.

The swelling in thickness of board of reduced wood usage were found to be significantly lower than that of typical wood usage, regardless of the applied particles for manufacture (comparing BT 1 with BT 6 and BT 2 with BT 7). This is to be seen in Figure 7 and proven on the basis of the results of statistical analysis given in Table 7 (measured data).

Regardless of the applied face and core layer particle for board manufacture, all boards of low wood usage (board types one to five, 500 kg/m<sup>3</sup>) reached a quite uniform level of thickness swelling after 2 h and 24 h of immersion in water each (Figure 7). Although mostly significant differences were found at the statistical comparison of the boards of varied composition with the relevant references (Table 7), no obvious regularity can be discerned. Due to that and quite uniform level of property for all low wood usage boards no relevance was attached to the results from statistical analysis. On contrary, for boards of typical wood usage (650 kg/m<sup>3</sup>) a significant increase of thickness swelling due to the face layer substitution by wafers was observed.

The swelling in thickness after 2 h of immersion in water of the low wood usage boards (board types two to five,  $500 \text{ kg/m}^3$ ) did not exceed that of the typical wood usage reference (BT 6 (FL-CL),  $650 \text{ kg/m}^3$ ). In the case of 24 h of immersion in water the swelling in thickness was significantly lower than that of the reference.

In total, the results show that thickness swelling is no critical property targeting a reduction of wood usage in particleboard manufacture.

## 3.2.6. Water Absorption

According to the set rules (IQR method) one extreme outlier was found in the case of BT 3 (WA 24 h). Furthermore, the data from one test specimen of BT 1 were excluded from the evaluation, as this was recognized as an outlier when considering the thickness swelling. The data for WA 2h and WA 24 h were normally distributed (Shapiro–Wilk-Test). For WA 2 h and WA 24 h both, the Levene-Test showed the presence of variance homogeneity across the board types. Consequently, the *F*-Test was used to

check whether there are significant differences between the board types. The Tukey–Kramer-Test was used for subsequent post hoc analysis.

After shifting the data additional extreme outliers to those already sorted out were found and also sorted out (BT 4 (TS 24 h, one test specimen), BT 7 (WA 2 h and WA 24 h, the same one test specimen)). All data sets were still normally distributed. As no homogeneity of variances was found, the shifted data sets were checked for significant differences applying the Welch-Test. For the subsequent post hoc analysis the Games–Howell-Test was used.

Water absorption of each both, 2 h and 24 h of immersion in water and low wood usage (500 kg/m<sup>3</sup>) and typical wood usage (650 kg/m<sup>3</sup>) board is on a quite uniform level regardless of the face and core layer particle applied for manufacture (Figure 7). Although water absorption was higher for boards of low wood usage than that of typical wood usage, this property has not to be considered as critical for the manufacture of wood-reduced particleboards.

## 4. Discussion

In the course of interpreting the influence of the varied parameters on the board properties, it became clear that especially the characteristic values derived from particle size and board structure characterization are helpful for objective assessment. Although the descriptive comparison of graphical representations (particle size distributions or density profiles) helps to evaluate the influence of particle variation, a more concrete statement is possible when comparing characteristic values, such as the mean particle size or the mean value of the maximum face layer density. In addition, characteristic values can be compared for (significant) differences by means of statistical tests. This becomes obvious where there are nominal differences between results, but where these are not significant, taking into account the range of variation. In total, it is therefore possible to make statements of higher quality when comparing characteristic values instead of diagrams.

On the basis of the observation of test specimen thickness and test specimen density, it could be seen that the variation of the particles used leads to a varying degree of lateral yielding of the particle mat during pressing and a spring back of the board thickness after the press is opened. On the one hand, this shows that the particles used are likely to have different compaction behavior. On the other hand, it becomes clear that, if uniform board thicknesses or board densities are desired, overspreading or an adapted pressing program (e.g., over pressing) must be used.

Against the background of the relationship between board density and board properties and the existence of non-uniform density across the board types, the board properties were shifted to the respective target density within the context of the evaluation of the results. Although this procedure only led to minor changes in the data, in the case of the bending properties, it was found that the previously identified influence of the core layer particle used was no longer apparent and was due solely to the differences in density. This side effect argues in favor of always looking at density-adjusted data in the future in order to avoid misinterpretations.

While the data of the density profile determination have already been scaled to a uniform board thickness with regard to the graphical representation, the observations from the comparison of the measured and the shifted board properties suggest that it might also be useful to shift the data of the density profile determination to the intended target density.

In view of the structural setup of early particleboards, the experiments showed that with an appropriately designed board cross-section, i.e., a low-density core layer and face layers of flat-shaped particles, it is possible to produce boards with conventional bending properties while reducing the amount of wood used. As can be seen from the combined consideration of board properties and density profile, the variation of face and core layer particles in boards with low wood usage has not, however, led to comparably pronounced density profiles as can be found in the case of boards with conventional wood usage (highly compressed face layers compared to core layer density). This means that, by replacing the particle, it is not so much the structure of the board that has changed (contrary to what was suspected in a previous study [25]), but rather the strength of the respective layer, regardless

of its density. It is therefore the particle itself or the adhesive bond between the particles that enables increased load-bearing capacity. While in the case of face layer particle, the size may be the cause, in the case of core layer particle, the cause must be assumed to be the type of manufacture. In comparison to the plant-made core layer particle, for the manufacture of the lab-made core layer particle fresh cutting blades were applied a careful drying and a more thorough screening. A change in the structural setup due to changed compaction behavior can only be observed when replacing the conventional face layer particle with the wafers in the case of internal bond strength. In addition to the possibly higher strength of the wafers themselves, the much higher surface-specific adhesive amount due to the particle size may also be the reason for the higher strength of the face layers built up from this particle. As the particle size increases, the particle surface area to be coated with adhesive decreases, so that with a constant amount of adhesive and wood used, more adhesive is effectively available to join the particles together. A corresponding sample calculation can be found in an earlier article [9].

Although it has been shown that by adjusting the particle geometry the decrease in board properties due to wood or density reduction could be compensated to a certain extent, it remains unclear whether the surface and edge quality reaches the required level. Together with the consideration of the economic efficiency of the production and processing of particles with different geometries, this is a question that needs to be clarified in subsequent work. In any case, however, it is clear that measures to increase the efficiency of raw materials (wood, adhesives, and energy) require measurement technology that can also automatically determine the thickness of particles in particular, thus enable an objective comparison of the particles actually produced.

#### 5. Conclusions

In this study, the effects of flat-shaped face layer particles and a core layer particle of intentionally greater thickness used as an alternative to typical particles on the properties of wood-reduced particleboards are presented. The properties of the boards made with these materials were compared with those of a typical wood application. The intention was to demonstrate the potential of changing the particle geometry for the production of wood-reduced boards while simultaneously achieving target properties.

The results show that despite a reduction in the use of wood, both the bending strength and the modulus of elasticity can be maintained at the level of boards with typical wood use if the face layer material is replaced by flat shaped particles. A partial substitution of the face layer particles in the form of an intermediate layer between the face and core layer led to an increase in the bending properties, but the level of the typical board was not reached.

An increase in the internal bond strength was observed through the alternative use of a lab-made core layer particle (presumably due to a more sensitive manufacturing process, e.g., fresh cutting blades, a careful drying and a more thorough screening) or wafers as face layer material (due to obviously different compaction behavior). However, the change in particle geometry was not able to maintain this property (IB) at the level of typical wood usage boards.

The present study combines current efforts to increase raw material efficiency with the early approaches of particleboard development. It was attempted to transfer the board structure developed by Fahrni with a low-density core layer and load-bearing face layers of flat-shaped particles to the production of wood-reduced particleboards. Although it has been shown that this approach can produce particleboard with less wood, but achieving bending properties equivalent to those of boards made from typical particles, it remains unclear whether other properties such as surface and edge quality meet current demands.

**Author Contributions:** Conceptualization, M.O. (formulation of research goals as part of funding acquisition) and J.T.B. (design of experiments); investigation, formal analysis, methodology, writing, J.T.B.; funding acquisition and project administration, M.O., All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL), Bonn/Berlin, Germany, based on a resolution of the German Bundestag [Parliament of the Federal Republic of Germany],

administrated by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. [Agency for Renewable Resources] (FNR), Gülzow-Prüzen, Germany. The contents of the present paper have been achieved within Part 1 of the joint research project "Entwicklung leichter Holzwerkstoffe unter Verwendung definierter Spanorientierung und Partikelmorphologie" [Development of lightweight wood-based boards using defined wood chip orientation and particle morphology], funding code 22005613.

Acknowledgments: The authors would like to thank the following people for their cooperation, which made this work possible: Michael Farnow (Ilim Nordic Timber GmbH & Co. KG) for providing timber material (forest-fresh pinewood boards), Klaus Richter, Fritz Tröger, Markus Knorz and Frank Moosmann (Wood Research Munich) for the possibility to manufacture the flat-shape face layer particles, Joachim Hasch (Swiss Krono Group, Luzern, Switzerland) and Maik Hirschberg (Swiss Krono sp z o.o.) for the supply of wood chips, typical face and core layer particles as well as adhesive and paraffin solution, and Helmut Roll (Pallmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG) for the manufacture of the core layer particle of intentionally greater thickness at the PRTC. Special thanks go to all those persons who were engaged in the experimental realization and data analysis, namely Dörte Bielenberg, Birgit Butenschön, Nick Engehausen, Sabrina Heldner, Hannes Köhm, and Bettina Steffen (all Thünen Institute of Wood Research).

**Conflicts of Interest:** The authors declare that they have no conflict of interest. Due to the formulation of the call for proposals by the project-executing agency, the funder had minimal indirect role in the design of the study, but definitely no role in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

# Cited Standards:

- DIN 66165-1:2016-08, Partikelgrößenanalyse—Siebanalyse—Teil1: Grundlagen [Particle size analysis— Sieving analysis—Part 1: Fundamentals]
- DIN 66165-2:2016-08, Partikelgrößenanalyse—Siebanalyse—Teil 2: Durchführung [Particle size analysis— Sieving analysis—Part 2: Procedure]
- DIN EN 310:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN 310:1993 [Wood-based panels; determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength; German version EN 310:1993]
- DIN EN 317:1993-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung; Deutsche Fassung EN 317:1993 [Particleboards and fibreboards; determination of swelling in thickness after immersion in water; German version EN 317:1993]
- DIN EN 319:1993-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene; Deutsche Fassung EN 319:1993 [Particleboards and fibreboards; determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board; German version EN 319:1993]
- DIN EN 323:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung der Rohdichte; Deutsche Fassung EN 323:1993 [Wood-based panels; determination of density; German version EN 323:1993]
- DIN ISO 9276-1:2004-09, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen—Teil 1: Grafische Darstellung (ISO 9276-1:1998) [Representation of results of particle size analysis—Part 1: Graphical representation (ISO 9276-1:1998)
- ISO 13322-1:2014-05, Particle size analysis—Image analysis methods—Part 1: Static image analysis methods
- ISO 13322-2:2006-11, Particle size analysis—Image analysis methods—Part 2: Dynamic image analysis methods

# References

- 1. Knauf, M. Understanding the consumer: Multi-modal market research on consumer attitudes in Germany towards lightweight furniture and lightweight materials in furniture design. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2015**, 73, 259–270. [CrossRef]
- 2. Klauditz, W.; Stegmann, G. About the suitability of poplar wood for the production of particleboards. *Holzforschung* **1957**, *11*, 174–179. (In German)
- 3. Plath, E. Influence of gross density on the properties of wood-based boards. *Holz Roh Werkst.* **1963**, *21*, 104–108. (In German) [CrossRef]
- 4. Keylwerth, R. Achieved and achievable reduction of anisotropy in wood-based boards. *Holz Roh Werkst.* **1959**, *17*, 234–238. (In German) [CrossRef]
- 5. Liiri, O. Investigations on properties of wood particle boards. *Paperi Puu* **1961**, *43*, 3–18.
- 6. Istek, A.; Siradag, H. The effect of density on particleboard properties. In Proceedings of the International Caucasian Forestry Symposium (ICFS), Artvin, Turkey, 25–26 October 2013; pp. 932–938.
- 7. Benthien, J.T.; Ohlmeyer, M. Influence of face-to-core layer ratio and core layer resin content on the properties of density-decreased particleboards. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2017**, *75*, 55–62. [CrossRef]

- 8. Sackey, E.K.; Semple, K.E.; Oh, S.W.; Smith, G.D. Improving core bond strength of particleboard through particle size redistribution. *Wood Fiber Sci.* **2008**, *40*, 214–224.
- 9. Benthien, J.T.; Lüdtke, J.; Ohlmeyer, M. Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2019**, *77*, 1029–1043. [CrossRef]
- 10. Wyss, O. On the patent history of particleboard. Holz Roh Werkst. 1981, 39, 399-404. [CrossRef]
- 11. Klauditz, W. Development, status and significance of particleboard production for the wood industry. *Holz Roh Werkst.* **1955**, *13*, 405–421. [CrossRef]
- 12. Deppe, H.J. Strands. In *Wood Encyclopedia*, 4th ed.; Lohmann, U., Ed.; DRW-Verlag: Stuttgart, Germany, 2003; Volume 2, pp. 450–451. ISBN 3-87181-355-9. (In German)
- 13. Keylwerth, R. On the mechanics of the multilayer particle board. *Holz Roh Werkst.* **1958**, *16*, 419–430. (In German) [CrossRef]
- 14. Kollmann, F. Wood-based Boards—Particleboards and Wood Particle Castings, Raw Materials, Manufacturing, *Planned Costs, Quality Control etc.*; Springer: Berlin, Germany, 1966; p. 535. ISBN 978-3-642-50247-7. (In German)
- 15. Turner, H.D. Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin-bonded wood-particle panels. *For. Prod. J.* **1954**, *4*, 210–223.
- 16. Kitahara, K.; Kasagi, K. Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chip-board. *Wood Ind.* **1955**, *10*, 406–412.
- 17. Post, P.W. Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake boards. *For. Prod. J.* **1958**, *8*, 317–322.
- 18. Brumbaugh, J. Effect of flake dimensions on properties of particle boards. For. Prod. J. 1960, 10, 243–246.
- 19. Dunky, M.; Niemz, P. Wood-based Boards and Adhesives—Technology and Influencing Factors; Springer: Berlin, Germany, 2002; pp. 668–670. ISBN 978-3-642-62754-5. (In German)
- 20. Liiri, O.; Kivistö, A.; Saarinen, A. The influence of wood species, chip size and binder on the strength and swelling of particleboards with higher elastomechanical properties. *Holzforsch. Holzverwert.* **1977**, *29*, 117–122. (In German)
- 21. Niemz, P. Investigations on the influence of structure on the properties of particle board—Part 1: Influence of particle size, board density, solid resin content and solid paraffin content. *Holztechnologie* **1982**, *23*, 206–213. (In German)
- 22. Niemz, P. Influence of selected structural parameters on the tensile and compressive strength of particleboards. *Holz Roh Werkst.* **1990**, *48*, 361–364. (In German) [CrossRef]
- 23. Niemz, P.; Bauer, S. Relationship between structure and properties of particleboard. Part 2: Shear modulus, shear strength, bending strength. *Holzforsch. Holzverwert.* **1991**, *43*, 68–70. (In German)
- Istek, A.; Aydin, U.; Özlüsoylu, I. The effect of chip size on the particleboard properties. In Proceedings of the International Congress on Engineering and Life Science (ICELIS), Kastamouno, Turkey, 26–29 April 2018; pp. 439–444.
- 25. Benthien, J.T.; Ohlmeyer, M.; Schneider, M.; Stehle, T. Experimental determination of the compression resistance of differently shaped wood particles as influencing parameter on wood-reduced particleboard manufacturing. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **2018**, *76*, 937–945. [CrossRef]
- Benthien, J.T.; Bähnisch, C.; Heldner, S.; Ohlmeyer, M. Effect of fiber size distribution on medium-denstiy fibreboard properties caused by varied streaming time and temperature of defibration process. *Wood Fiber Sci.* 2014, 46, 175–185.
- Seppke, B.; Bähnisch, C.; Benthien, J.T.; Heldner, S.; Ohlmeyer, M. A Concurrent Skeleton-based Approach for the Characterization of Wood Fibers with Sub-pixel Precision for Fiber Board Production. In Proceedings of the 10th International Conference on Mass Data Analysis of Images and Signals (MDA), Hamburg, Germany, 11–14 July 2015.
- 28. Jensen, U.; Kehr, E. Quantitative evaluation of density profiles of particleboard and MDF. *Holz Roh Werkst*. **1995**, *53*, 16. (In German) [CrossRef]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
## <u>Erklärung</u>

Hiermit erkläre ich gem. der Promotionsordnung des Fachbereichs Biologie der Universität Hamburg, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig angefertigt habe, alle wörtlich oder inhaltlich aus anderen Quellen übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Inanspruchnahme fremder Hilfen namentlich aufgeführt habe.

Jan Deutz