



Universität Hamburg
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

Zum Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

Doctor rerum naturalium

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Fachbereich Biologie

Institut für Holzwissenschaften

der Universität Hamburg

Nick Engehausen

aus Hamburg

Hamburg, 19. Januar 2026

Vorsitzender der Prüfungskommission:

- Prof. Dr. habil. Bodo Saake, Institut für Holzwissenschaften

Stellvertretende Vorsitzende der Prüfungskommission:

- Prof. Dr. Linnea Hesse, Institut für Holzwissenschaften

Dissertationsgutachter:

- Prof. Dr. Linnea Hesse, Institut für Holzwissenschaften
- Prof. Dr. Carsten Mai, Georg-August-Universität, Göttingen

Disputationsgutachter:

- Prof. Dr. Linnea Hesse, Institut für Holzwissenschaften
- Prof. Dr. Andreas Krause, Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg

Zusätzliche Fragestellerin:

- Prof. Dr. Elisabeth Magel, Institut für Holzwissenschaften

Datum der Disputation: 21.04.2026

Auflistung der für diese kumulative Dissertation herangezogenen Publikationen sowie eines zur Veröffentlichung eingereichten Manuskriptes mit Darstellung des jeweiligen Eigenanteils

Im Folgenden sind die für diese kumulative Dissertation herangezogenen Publikationen bzw. ein bei einer Fachzeitschrift zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript aufgelistet. Anschließend wird für jede dieser Arbeiten der Eigenanteil des Promotionskandidaten auf einem gesonderten Formular dargestellt.

Publikation 1

Engehausen N., Benthien J.T., Lüdtke J. (2024). Influence of particle size on the mechanical properties of single-layer particleboards. *Fibers*, 12(4), 32. <https://doi.org/10.3390/fib12040032>

Publikation 2

Engehausen N., Benthien J.T., Lüdtke J. (2025). Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(3), 123. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02275-3>

Eingereichtes Manuskript

Engehausen N., Benthien J.T., Lüdtke J., Rief S., Kabel M., Krause A., Hesse L. X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation.



Declaration about personal contribution to manuscripts/publications in a cumulative thesis (please submit one form per manuscript/publication)

Candidate's name: Nick Engehausen

Manuscript (including all authors, title, and if applicable journal, year; mark all first authors with asterisk):

Engehausen, N.*, Benthien, J. T., & Lüdtkke, J. (2024). Influence of particle size on the mechanical properties of single-layer particleboards. *Fibers*, 12(4), 32.

Link to publication (if published):

<https://doi.org/10.3390/fib12040032>

Detailed description of own contribution to this manuscript

Conceptualization and planning of project:

Das Hauptziel der in dieser Dissertation zusammengeführten Forschungsarbeiten, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten genauer zu untersuchen, wurde mit dem Forschungsprojekt „3VER“ (Titel: Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenindustrie; FNR-Förderkennzeichen: 2220HV090X; Laufzeit: 01.12.2021 – 31.08.2025) entwickelt. Das Projekt wurde vom Promotionskandidaten in Zusammenarbeit mit Dr. Jan Lüdtkke und Dr. Jan Thore Benthien konzeptioniert, geplant und beantragt.

Method development:

Die methodische Konzeption der Forschungsarbeiten, die dieser Publikation zugrunde liegen, wurde vom Promotionskandidaten in enger Zusammenarbeit mit den Kollegen Dr. Jan Thore Benthien und Dr. Jan Lüdtkke vorgenommen. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der methodischen Konzeption: 95 %)

Data generation and analyses (including contribution to specific figures):

Alle experimentellen Arbeiten wurden federführend vom Promotionskandidaten, zum Teil mit Unterstützung technischer Assistenten und studentischer Hilfskräfte, durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte ebenfalls durch den Promotionskandidaten, teilweise mit beratender Unterstützung durch die Betreuer dieser Arbeit, namentlich Prof. Linnea Hess und Prof. Andreas Krause, bzw. die zuvor genannten Kollegen oder technisches Personal. Alle Grafiken und Tabellen wurden vom Promotionskandidaten selbst erstellt. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Datenerhebung und -Analyse: 90 %)

Writing and editing of manuscript:

Das Publikationsmanuskript wurde komplett eigenständig vom Promotionskandidaten verfasst. Die Verbesserungsvorschläge der Co-Autoren führten zu keinen grundlegenden Änderungen des Erstentwurfes. Der zur Veröffentlichung der Publikation durchgeführten Review-Prozess wurden vom Promotionskandidaten eigenständig abgewickelt. Der Promotionskandidat ist alleiniger Erstautor der Publikation. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Verfassung der Erstversion des Manuskriptes: 100 %)


I confirm that the above information is accurate

Candidate

Supervisor name:

Hamburg, 17.12.25, N. Engehausen
Place, date Signature of candidate

12.17.25
Place, date


Signature of supervisor



Declaration about personal contribution to manuscripts/publications in a cumulative thesis (please submit one form per manuscript/publication)

Candidate's name: Nick Engehausen

Manuscript (including all authors, title, and if applicable journal, year; mark all first authors with asterisk):

Engehausen, N.*, Benthien, J. T., & Lüdtkke, J. (2025). Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard. European Journal of Wood and Wood Products, 83(3), 123.

Link to publication (if published):

<https://doi.org/10.1007/s00107-025-02275-3>

Detailed description of own contribution to this manuscript

Conceptualization and planning of project:

Das Hauptziel der in dieser Dissertation zusammengeführten Forschungsarbeiten, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten genauer zu untersuchen, wurde mit dem Forschungsprojekt „3VER“ (Titel: Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenindustrie; FNR-Förderkennzeichen: 2220HV090X; Laufzeit: 01.12.2021 – 31.08.2025) entwickelt. Das Projekt wurde vom Promotionskandidaten in Zusammenarbeit mit Dr. Jan Lüdtkke und Dr. Jan Thore Benthien konzeptioniert, geplant und beantragt.

Method development:

Die methodische Konzeption der Forschungsarbeiten, die dieser Publikation zugrunde liegen, wurde vom Promotionskandidaten in enger Zusammenarbeit mit den Kollegen Dr. Jan Thore Benthien und Dr. Jan Lüdtkke vorgenommen. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der methodischen Konzeption: 90 %)

Data generation and analyses (including contribution to specific figures):

Alle experimentellen Arbeiten wurden federführend vom Promotionskandidaten, zum Teil mit Unterstützung technischer Assistenten und studentischer Hilfskräfte, durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte ebenfalls durch den Promotionskandidaten, teilweise mit beratender Unterstützung durch die Betreuer dieser Arbeit, namentlich Prof. Linnea Hesse und Prof. Andreas Krause, bzw. die zuvor genannten Kollegen oder technisches Personal. Alle Grafiken und Tabellen wurden vom Promotionskandidaten selbst erstellt. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Datenerhebung und -Analyse: 90 %)


Writing and editing of manuscript:


Das Publikationsmanuskript wurde komplett eigenständig vom Promotionskandidaten verfasst. Die Verbesserungsvorschläge der Co-Autoren führten zu keinen grundlegenden Änderungen des Erstentwurfes. Der zur Veröffentlichung der Publikation durchgeführten Review-Prozess wurden vom Promotionskandidaten eigenständig abgewickelt. Der Promotionskandidat ist alleiniger Erstautor der Publikation. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Verfassung der Erstversion des Manuskriptes: 100 %)

I confirm that the above information is accurate

Candidate

Supervisor name:

Hamburg, 17.12.25 
Place, date Signature of candidate

17.12.25 
Place, date Signature of supervisor



Declaration about personal contribution to manuscripts/publications in a cumulative thesis (please submit one form per manuscript/publication)

Candidate's name: Nick Engehausen

Manuscript (including all authors, title, and if applicable journal, year; mark all first authors with asterisk):

Engehausen, N.*, Benthien, J. T., Lüdtkke, J., Rief, S., Kabel, M., Krause, A., Hesse, L. X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation.

Link to publication (if published):

Detailed description of own contribution to this manuscript

Conceptualization and planning of project:

Das Hauptziel der in dieser Dissertation zusammengeführten Forschungsarbeiten, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten genauer zu untersuchen, wurde mit dem Forschungsprojekt „3VER“ (Titel: Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenindustrie; FNR-Förderkennzeichen: 2220HV090X; Laufzeit: 01.12.2021 – 31.08.2025) entwickelt. Das Projekt wurde vom Promotionskandidaten in Zusammenarbeit mit Dr. Jan Lüdtkke und Dr. Jan Thore Benthien konzeptioniert, geplant und beantragt.

Method development:

Die methodische Konzeption der Forschungsarbeiten, die diesem Manuskript zugrunde liegen, wurde vom Promotionskandidaten in enger Zusammenarbeit mit der Hauptbetreuerin Prof. Dr. Linnea Hesse, dem Co-Betreuer Prof. Dr. Andreas Krause sowie dem Kollegen Dr. Jan Lüdtkke vorgenommen. Ebenfalls hierzu beigetragen haben die Co-Autoren vom Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), namentlich Dr. Matthias Kabel und Dr. Stefan Rief. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der methodischen Konzeption: 85 %)

Data generation and analyses (including contribution to specific figures):

Alle experimentellen Arbeiten, bis auf die FEM-Modellierungen, welche das ITWM durchführte, wurden federführend vom Promotionskandidaten, zum Teil mit Unterstützung technischer Assistenten und studentischer Hilfskräfte, durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte ebenfalls durch den Promotionskandidaten, teilweise mit beratender Unterstützung durch die Betreuer dieser Arbeit bzw. die Co-Autoren. Die Grafiken und Tabellen wurden überwiegend vom Promotionskandidaten selbst erstellt. Die Spannungsvisualisierungen wurden vom ITWM beigetragen. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Datenerhebung und -Analyse: 85 %)


Writing and editing of manuscript:

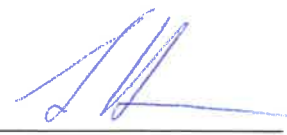
Das Publikationsmanuskript wurde komplett eigenständig vom Promotionskandidaten verfasst. Die Verbesserungsvorschläge der Co-Autoren führten zu keinen grundlegenden Änderungen des Erstentwurfes. Der Promotionskandidat ist alleiniger Erstautor des Manuskriptes. (Eigenanteil des Promotionskandidaten an der Verfassung der Erstversion des Manuskriptes: 100 %)

I confirm that the above information is accurate

Candidate

Supervisor name:

Hamburg, 27.04.2026 
Place, date Signature of candidate

Hamburg, 27.04.2026 
Place, date Signature of supervisor

„Das Feuer ist der Altar des Lebens im Freien.
Sein wabernder Rauch steigt auf wie die Gedanken der Menschen,
und seine Funken sind wie menschliches Leben.

Die Kaffeekanne ist Sinnbild der Geselligkeit.

Der grob geschnitzte Stab, des Wanderers drittes Bein,
ist Sinnbild seiner Entschlossenheit,
unermüdlich weiterzutrotten.“

[Stephen Graham (1926).
The Gentle Art of Tramping.
Aus dem Englischen übersetzt
von Andrea Kunstmann]

Vorwort

Die in der vorliegenden kumulativen Dissertation ausgewerteten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenindustrie“ (Kurztitel: „3VER“; FNR-Förderkennzeichen: 2220HV090X; Laufzeit: 01.12.2021 – 31.08.2025) durchgeführt. Grundlage der Dissertation sind zwei in referierten Fachzeitschriften veröffentlichte Publikationen sowie ein zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt allen, die zu der Entstehung dieser Dissertation beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich meine Betreuerin Prof. Dr. Linnea Hesse, meinen Co-Betreuer Prof. Dr. Andreas Krause sowie meinen Kollegen Dr. Jan Lüdtkke. Außerdem gilt ein besonderer Dank, für durchweg hilfreiche und richtungsweisende Unterstützung sowie stets spannenden Diskurs zu den behandelten Forschungsthemen, meinem geschätzten Kollegen Dr. Jan Benthien. Darüber hinaus danke ich allen technischen Assistenten und studentischen Hilfskräften für die tatkräftige Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Abstract	3
1 Einleitung und Zielsetzung	5
2 Stand des Wissens	7
2.1 Spangeometrie	7
2.1.1 Spangröße	7
2.1.2 Spanabmessungen.....	7
2.1.3 Spanform.....	8
2.2 Ausbildung der Spangeometrie bei der Zerspanung	9
2.3 Orientierung der Holzfasern in Relation zur Spangeometrie	10
2.4 Verfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie	11
2.5 Einfluss der Spangeometrie auf die Schütt- und Mattendichte sowie die Ausprägung des Rohdichteprofils	14
2.6 Bedeutung der Spangeometrie bei der Beleimung von Spänen	15
2.7 Einfluss der Spangeometrie auf ausgewählte Eigenschaften von Spanplatten.....	16
2.7.1 Einfluss auf die Biegeeigenschaften.....	18
2.7.2 Einfluss auf die Querkzugfestigkeit.....	22
2.7.3 Einfluss auf die Sorptionseigenschaften	25
2.8 Einfluss der Spangeometrie auf die Porenstruktur von Spanplatten.....	27
3 Zusammenfassung der für diese Dissertation herangezogenen Publikationen sowie eines zur Veröffentlichung eingereichten Manuskriptes.....	29
3.1 Publikation 1: Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards (Engehausen et al. (2024) Fibers, 12(4), 32).....	29

3.2	Publikation 2: Investigation on the Influence of Particle Size and Surface-Specific Adhesive Amount on Mechanical Properties and Sorption Behavior of Particleboard (Engehausen et al. (2025) European Journal of Wood and Wood Products, 83(3), 123)	31
3.3	Eingereichtes Manuskript: X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation	34
4	Diskussion	36
4.1	Methodische Einflussfaktoren und deren Bedeutung für die Interpretation des Einflusses der Spangeometrie	36
4.1.1	Bestehende Untersuchungen	36
4.1.2	Eigene Untersuchungen	39
4.2	Spangeometrie im Kontext ausgewählter Eigenschaften von Spanplatten	41
4.2.1	Biegeeigenschaften	41
4.2.2	Querzugfestigkeit	46
4.2.3	Sorptionseigenschaften	48
4.3	Ausprägung der Porenstruktur und Verdichtung der Holzsubstanz in Abhängigkeit der Spangeometrie	51
4.4	Poren- und Spanstruktur im Kontext makroskopischer Eigenschaften von Spanplatten	53
5	Fazit und Ausblick	56
6	Literaturverzeichnis	58
	Normenverzeichnis	67
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	69
	Anhang	70

Zusammenfassung

Die Spangeometrie, verstanden als Überbegriff für die räumliche Ausdehnung eines Holzspans in seinen drei Hauptachsen sowie seine räumliche Gestalt, stellt neben weiteren material- und prozessbedingten Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften von Spanplatten dar. Zahlreiche Studien, die in dieser kumulativen Dissertation zusammengefasst und übergreifend diskutiert werden, haben sich mit diesem Zusammenhang befasst, jedoch wird der Einfluss der Spangeometrie häufig durch methodisch bedingte Störgrößen überlagert, sodass sich in vielen Fällen keine Grundzusammenhänge ableiten lassen. Zudem werden die strukturellen Ursachen des Einflusses der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften in bestehenden Untersuchungen häufig nicht vertiefend analysiert.

Vor diesem Hintergrund bestand die übergeordnete Zielsetzung dieser Dissertation darin, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten systematisch zu untersuchen und die zugrunde liegenden strukturellen Ursachen der beobachteten Eigenschaftsänderungen zu analysieren. Die Arbeit basiert dabei auf zwei in referierten Fachzeitschriften veröffentlichten Publikationen sowie einem zur Veröffentlichung eingereichten Manuskript. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Betrachtung des isolierten Einflusses der Spangröße. Die Spangröße wird in der vorliegenden Arbeit als eine aus der Siebanalyse abgeleitete Kenngröße verstanden, die eine Siebfraktion sowie die Größe der darin enthaltenen Späne über die zugehörigen Siebmaschenweiten charakterisiert.

Zur Isolation des Einflusses der Spangröße wurden in den eigenen Forschungsarbeiten einschichtige Laborspanplatten mit homogenem Rohdichteprofil hergestellt, wobei für Plattentypen unterschiedlicher Spangröße die oberflächenspezifische Klebstoffmenge konstant gehalten wurde. Darüber hinaus wurde für alle Plattentypen eine einheitliche Zieldichte und -dicke gewählt. Aus der Untersuchung dieser Plattentypen lassen sich folgende Grundzusammenhänge ableiten. Mit zunehmender Spangröße nehmen die Biegefestigkeit, der Biege-Elastizitätsmodul (Biege-E-Modul) und die Querkzugfestigkeit ab, während die Dickenquellung und die Wasserabsorption zunehmen.

Ergänzend wurde der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge untersucht, da dieser den Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften in vielen bestehenden Untersuchungen überlagert. Hierzu wurden nach dem zuvor beschriebenen Ansatz Laborspanplatten aus Spanmaterial derselben Siebfraktion und damit gleicher Spangröße hergestellt, bei denen

ausschließlich die oberflächenspezifische Klebstoffmenge variiert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge mit verbesserten mechanischen Eigenschaften sowie einer reduzierten Dickenquellung und Wasserabsorption einhergeht.

Über die Betrachtung makroskopischer Eigenschaften hinaus werden in der vorliegenden Arbeit die strukturellen Ursachen der beobachteten Eigenschaftsänderungen analysiert. Auf Grundlage von Untersuchungen der Laborspanplatten unterschiedlicher Spangröße mittels Mikro-Computertomographie (μ CT) konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Spangröße mit einer veränderten Porenstruktur einhergeht, die sich unter anderem in einer erhöhten Porosität und größeren interpartikulären Hohlräumen der betrachteten Plattentypen äußert. Anhand von Simulationen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) auf Basis der aus den tomographischen Untersuchungen gewonnenen Datensätze konnte gezeigt werden, dass diese strukturellen Veränderungen zu einer stärkeren Konzentration von Spannungen führen und damit die mechanischen Eigenschaften der Platten negativ beeinflussen, was sich direkt in simulierten Elastizitätsmodulen (E-Modulen) widerspiegelte.

Insgesamt leistet die vorliegende Dissertation unter Zusammenführung bestehender Untersuchungen und eigener Forschungsarbeiten einen Beitrag zum vertieften Verständnis des Zusammenhangs zwischen Spangeometrie, Materialstruktur und den daraus resultierenden Eigenschaften von Spanplatten.

Abstract

Particle geometry, understood as a hypernym describing the spatial extent of a wood particle along its three principal axes and its three-dimensional shape, represents, alongside further material- and process-related factors, a major influence on the properties of particleboards. Numerous studies that are compiled and discussed in a comprehensive manner in this cumulative dissertation have addressed this relationship; however, the influence of particle geometry is often masked by methodologically induced confounding factors, so that fundamental relationships cannot be derived in many cases. In addition, the structural causes underlying the influence of particle geometry on board properties are frequently not analyzed in depth in existing studies.

Against this background, the overarching objective of this dissertation was to systematically investigate the influence of particle geometry on the properties of particleboards and to analyze the underlying structural causes of the observed changes in properties. The work is based on two publications published in peer-reviewed journals as well as one manuscript submitted for publication. The focus of the investigations was on the analysis of the isolated influence of particle size. In the present work, particle size is understood as a characteristic parameter derived from sieve analysis that characterizes a sieve fraction and the size of the particles contained therein via the corresponding sieve mesh sizes.

To isolate the influence of particle size in the conducted studies, single-layer laboratory particleboards with a homogeneous density profile were manufactured, while the surface-specific adhesive amount was kept constant for board types with different particle sizes. In addition, a uniform target density and target thickness were selected for all board types. From the investigation of these board types, the following fundamental relationships can be derived. With increasing particle size, modulus of rupture, modulus of elasticity, and internal bond strength decrease, whereas thickness swelling and water absorption increase.

In addition, the influence of the surface-specific adhesive amount was investigated, as this factor masks the influence of particle geometry on board properties in many existing studies. For this purpose, laboratory particleboards were manufactured according to the previously described approach using particle material from the same sieve fraction and thus of identical particle size, while exclusively varying the surface-specific adhesive amount. The results show that an increase in the surface-specific adhesive amount is associated with improved mechanical properties as well as reduced thickness swelling and water absorption.

Beyond the consideration of macroscopic properties, the present study analyses the structural causes of the observed changes in properties. Based on investigations of laboratory particleboards with different particle sizes using micro-computed tomography (μ CT), it was shown that an increase in particle size is associated with a modified pore structure, which is reflected, among other aspects, in increased porosity and larger interparticle voids of the investigated board types. On the basis of datasets obtained from the tomographic investigations, simulations employing the finite element method (FEM) showed that these structural changes lead to a stronger concentration of stresses and thus negatively affect the mechanical properties of the boards, which was directly reflected in the simulated moduli of elasticity.

Overall, by integrating existing studies and own research, this dissertation contributes to a deeper understanding of the relationship between particle geometry, material structure, and the resulting properties of particleboards.

1 Einleitung und Zielsetzung

Obwohl Spanplatten zum größten Teil aus Spänen bestehen und deren Geometrie einen wesentlichen Einfluss auf die Platteneigenschaften hat (Moslemi, 1974; Rackwitz, 1963), liegt hier noch Forschungsbedarf vor. Dies ist zum einen auf das lange Fehlen eines geeigneten Spanvermessungsverfahrens zurückzuführen, welches es erlaubt die Spanabmessungen sowie die Spanoberfläche und das Spanvolumen zuverlässig zu bestimmen. Zum anderen lassen die Versuchsaufbauten vieler bestehender Untersuchungen nur bedingt einen Rückschluss auf den Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften zu. Ein wesentlicher Aspekt besteht darin, dass in vielen Untersuchungen Spanplatten aus Spanmaterialien variierender Geometrie und damit variierender spezifischer Spanoberfläche bei konstanter massenspezifischer Beleimung hergestellt werden, was eine unterschiedlich hohe Beleimung in Bezug auf die Oberfläche der Späne zur Folge hat. Bekanntermaßen begünstigt eine Erhöhung des massenspezifischen Klebstoffgehaltes bzw. der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge die Vernetzung der Späne untereinander und beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten damit positiv, während deren Dimensionsstabilität unter Feuchteinfluss abnimmt (Liiri, 1960). Folglich überlagern in bestehenden Untersuchungen oftmals methodisch bedingte Störfaktoren den Einfluss der Spangeometrie, sodass sich nur bedingt Grundzusammenhänge ableiten lassen. Darüber hinaus werden die strukturellen Ursachen für beobachtete Eigenschaftsänderungen meist nicht mit untersucht.

Vor diesem Hintergrund bestand die übergeordnete Zielsetzung der in dieser Dissertation zusammengeführten Forschungsarbeiten darin, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten systematisch zu untersuchen und die zugrunde liegenden strukturellen Ursachen der beobachteten Eigenschaftsänderungen zu analysieren.

In den eigenen Untersuchungen liegt der Fokus auf dem Einfluss der Spangröße auf die Platteneigenschaften. Um diesen zu isolieren, wurden Laborspanplatten aus Spanfraktionen unterschiedlicher Spangröße nach folgenden Kriterien hergestellt und deren Eigenschaften untersucht:

- Einschichtiger Plattenaufbau
- Homogenes Rohdichteprofil
- Gezielt eingestellte oberflächenspezifische Klebstoffmenge
- Konstante Zieldichte und -dicke

Die für die Plattenherstellung eingesetzten Spanfraktionen wurden im Vorfeld mit Hilfe eines laserbasierten 3D-Spanvermessungsgerätes stichprobenartig vermessen und damit die Spanlänge, -breite und -dicke sowie die Spanoberfläche und das Spanvolumen bestimmt. Die Einstellung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge erfolgte auf Basis der spezifischen Spanoberfläche und wurde für Spanfraktionen unterschiedlicher Größe konstant gehalten bzw. gezielt variiert.

Mit der Untersuchung, die der ersten Publikation (Kapitel 3.1) zugrunde liegt, wird zunächst anhand von zwei extremen Spangrößen untersucht, ob ein Einfluss der Spangröße auf die Platteneigenschaften vorliegt. Zu diesem Zweck wurden nach dem zuvor genannten Schema Laborspanplatten aus feinen (Deckschicht-) Spänen bzw. groben (Mittelschicht-) Spänen hergestellt, deren Biegefestigkeit, Biege-E-Modul und Querkzugfestigkeit bestimmt und miteinander verglichen. Zusätzlich wird anhand von Laborspanplatten aus jeweils demselben Spanmaterial identischer Spangröße der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge auf die Platteneigenschaften untersucht.

Die Untersuchung, die der zweiten Publikation (Kapitel 3.2) zugrunde liegt, zielt darauf ab, den Einfluss der Spangröße auf die Platteneigenschaften genauer zu untersuchen und Trends abzuleiten. Zu diesem Zweck wurden aus industriellen Mittelschichtspänen mit Hilfe eines Taumelsiebes vier Spanfraktionen erzeugt und aus diesen nach dem zuvor genannten Schema Laborspanplatten hergestellt, deren Eigenschaften bestimmt und miteinander verglichen. Betrachtet werden Biegefestigkeit, Biege-E-Modul, Querkzugfestigkeit, Dickenquellung und Wasserabsorption. Zusätzlich wird auch hier der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge auf die Platteneigenschaften untersucht.

Mit der Untersuchung, die der dritten zur Publikation vorgesehenen Arbeit (Kapitel 3.3) zugrunde liegt, werden die in den Laborprüfungen gefundene Korrelationen zwischen der Spangröße und den Platteneigenschaften genauer untersucht. Zu diesem Zweck wurde einerseits die Porenstruktur der für die zweite Publikation (Kapitel 3.2) hergestellten Plattentypen bestehend aus unterschiedlichen Spanfraktionen anhand von μ CT-Scans analysiert. Andererseits wurden auf Basis der tomographischen Daten FEM-Simulationen von Dreipunkt-Biegebelastungen sowie Zugbelastungen in allen Hauptmaterialrichtungen sowie die daraus resultierenden Spannungen und E-Module simuliert und mit den Ergebnissen der mechanischen Laborprüfungen verglichen.

2 Stand des Wissens

2.1 Spangeometrie

Der Begriff der Spangeometrie wird in der vorliegenden Arbeit als Überbegriff für die räumliche Ausdehnung eines Holzspans in seinen drei Hauptachsen sowie seine räumliche Gestalt verstanden. Er fasst mit anderen Worten die Spanabmessungen und die Spanform zusammen (Moslemi, 1974), die wiederum die Oberfläche und das Volumen eines Spans bestimmen. Details zu den Begriffen Spangröße, Spanabmessungen und Spanform sind im Folgenden aufgeführt.

2.1.1 Spangröße

Der Begriff der Spangröße (engl. *particle size*) findet auf unterschiedliche Weise Verwendung. Einerseits wird mit diesem allgemein die räumliche Ausdehnung eines Holzspans beschrieben. Andererseits wird der Begriff als eine aus der Siebanalyse von Holzspänen abgeleitete Kenngröße verstanden, die eine Siebfraction sowie die Größe der darin enthaltenen Späne über die zugehörigen Siebmaschenweiten charakterisiert (Benthien, 2022). Als Untergrenze wird die Maschenweite des Siebes, welches die Späne der Spanfraction zurückgehalten hat angegeben. Als Obergrenze wird die Maschenweite des feinsten Siebes, welches die Späne der Spanfraction passiert haben, angegeben. Letzterer Zusammenhang ist Grundlage für die Verwendung des Begriffs in der vorliegenden Arbeit sowie in den eigenen Publikationen (Kapitel 3.1 und 3.2) bzw. der zur Publikation vorgesehenen Studie (Kapitel 3.3).

2.1.2 Spanabmessungen

Die Spanabmessungen, auch als Spandimensionen bezeichnet, werden in der vorliegenden Arbeit als die räumliche Ausdehnung eines Holzspans in seinen drei Hauptachsen, namentlich Spanlänge, Spanbreite und Spandicke verstanden. Niemz und Wenk (1989) definieren die Spanlänge genauer als die maximale Ausdehnung in Faserrichtung, die Spanbreite als die maximale Ausdehnung senkrecht zur Faserrichtung und die Spandicke als die maximale Ausdehnung senkrecht zur Partikelfläche. Weiter weisen sie darauf hin, dass bedingt durch den anatomischen Holzaufbau, insbesondere im Falle einer Nachzerkleinerung von Spänen, die Spanabmessungen straff miteinander korrelieren.

Niemz und Wenk (1989) geben eine tabellarische Übersicht zu Mittelwertbereichen von Abmessungen von für die industrielle Spanplattenproduktion eingesetzten Deck- und

Mittelschichtspäne, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Die Autoren weisen darauf hin, dass die aufgeführten Werte nur eine grobe Größenordnung für Deck- und Mittelschichtspäne darstellen, da die Einzelwerte der Spanabmessungen von Spänen in einem Spangemisch stark um den Mittelwert streuen. In den Ausführungen von Niemz und Wenk (1989) werden keine Angaben zur Spanbreite von Deckschichtspänen gemacht, weshalb diese zur Ergänzung von Tabelle 1 aus Benthien et al. (2022a) übernommen wurden. Eine Definition von Feingut nach Staub bzw. Feinstspänen nimmt Jensen (1966) über Siebmaschenweitenbereiche von 0–0,315 mm bzw. 0,315–1 mm vor.

Tabelle 1 Übersicht von Mittelwertbereichen der Spanabmessungen industrieller Deck- und Mittelschichtspänen in Anlehnung an eine tabellarische Übersicht von Niemz und Wenk (1989). Angaben zur Spanbreite von Deckschichtspänen wurden nach Benthien et al. (2022a) ergänzt

Spanmaterial	Spanlänge (mm)	Spanbreite (mm)	Spandicke (mm)
Deckschichtspäne	3–10	0,3–1,3	0,1–0,3
Mittelschichtspäne	8–15	1,5–4,0	0,4–2,0

2.1.3 Spanform

Im Allgemeinen ist unter dem Begriff der Spanform der Verlauf der äußeren Oberfläche eines Holzspans bzw. seine räumliche Gestalt zu verstehen. Dunky (1988, S. 126–128) beschreibt die Spanform feiner, mittlerer und grober Späne, wie sie in der Spanplattenherstellung Verwendung finden, vereinfachend als „[...] quaderförmig, flächig [...]“ und schreibt dem Feingut bzw. Staub und Feinstspänen eine „[...] würfelförmige Gestalt [...]“ zu. Im Großteil der bestehenden Literatur wird die Spanform über Abmessungsverhältnisse bzw. Formfaktoren beschrieben, die ebenfalls in der Arbeit von Dunky (1988) zusammengefasst sind. Aufgeführt werden der Schlankheitsgrad (Spanlänge/Spandicke), das Breitenverhältnis (Spanlänge/Spanbreite) und die Platttheit (Spanbreite/Spandicke).

Einen moderneren Ansatz zu Klassifizierung von Partikelformen, der nicht explizit für die Beschreibung der Form von Holzspänen vorgesehen ist, aber hier für eine mögliche Verwendung in zukünftigen Studien Erwähnung finden soll, liefern Angelidakis et al. (2022). Hier werden Partikel nach ihrem Längen-Breiten-Verhältnis („elongation“) und Dicken-Breiten-Verhältnis („flatness“) einer Matrix zugewiesen und nach den Formen klingenförmig („bladed“), länglich („elongated“), flach („flat“) bzw. kompakt („compact“) klassifiziert.

2.2 Ausbildung der Spangeometrie bei der Zerspanung

Bei der Zerspanung von Holz entsteht stets ein Gemisch aus Spänen, die sich in ihren Abmessungen und ihrer Form unterscheiden. Grundsätzlich können drei Hauptwege der gezielten Zerspanung zur Produktion von Spänen für die Spanplattenindustrie unterschieden werden. Die Zerspanung von Rundholz (bzw. Schwarten und Spreißeln), von Hackschnitzeln oder von Altholz. Die direkte Zerspanung von Rundholz und ähnlichen Sortimenten erfolgt über Messerwellen-, Messerscheiben- oder Messerkopfzerspaner. Hackschnitzel hingegen werden beispielsweise aus Rundholz über Messerscheiben- oder Messerwellenhacker hergestellt und mit Hilfe von Messerringzerspanern zu Spänen weiterverarbeitet. Altholz wird in der Regel durch Brecher vorzerkleinert und in Hammermühlen nachzerkleinert. Die Aufbereitung von Altholz umfasst viele weitere Schritte um insbesondere Fremd- und Störstoffe abzuscheiden, die hier nicht mit aufgeführt werden. Gegebenenfalls erfolgt im Anschluss an die aufgeführten Zerspanungsverfahren eine Nachzerkleinerung über beispielsweise Hammermühlen. (Dunky & Niemz, 2002)

Das angewandte Zerspanungsverfahren bzw. Mahlverfahren hat Einfluss auf die Spangeometrie- und -verteilung des erzeugten Spangutes. Die Verfahren und Einflussfaktoren sind zu vielfältig, um zur Ausprägung der Spangeometrie pauschale Aussagen zu treffen. Es lassen sich jedoch einige Grundsätze aus der bestehenden Literatur ableiten. So wird zum Beispiel wie von Niemz und Wenk (1989, S. 118) zwischen Schneid- und Schlagspänen unterschieden. Genauer wird ausgeführt, dass Schneidspäne durch einen Schneidvorgang (z. B. im Messerringzerspaner) erzeugt werden. Nach den Autoren sind dieses „[...] faserparallel und haben glatte Schnittflächen [...]“. Schlagspäne werden demnach „[...] durch schlagend oder reißend arbeitende Werkzeuge in Mühlen gefertigt. Sie sind splittrig, unregelmäßig und haben eine stark zerklüftete Oberfläche.“. Niemz (1983) führt auf, dass bei der Zerspanung die Beschaffenheit der Oberfläche der erzeugten Späne vom eingesetzten Zerspanungsaggregat, dem Zustand der Schneiden und der Holzfeuchtigkeit abhängt. Liiri (1960) untersucht unter anderem den Einfluss der Schneidenabnutzung im Zerspaner. Mit zunehmender Schneidenabnutzung stellt Liiri eine Abnahme der Spanlänge und -breite sowie eine Zunahme der Variation der Spandicke fest. Darüber hinaus nimmt demnach der Feinanteil mit zunehmender Schneidenabnutzung zu.

In gewissen Grenzen lässt sich die Spangeometrie bei der Zerspanung steuern. Dies gilt insbesondere für die erzeugte Spandicke, die beispielsweise im Messerringzerspaner über den Messerüberstand reguliert werden kann (Benthien & Ohlmeyer, 2020). Die Spanlänge lässt sich in

gewissen Grenzen über die Größe der Hackschnitzel bzw. Vorritzmesser steuern. Eine Regulierung der Spanbreite ist im Rahmen der genannten Zerspanungsverfahren schwer zu realisieren.

2.3 Orientierung der Holzfasern in Relation zur Spangeometrie

Ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit der Zerspanung aufgeführt werden sollte, ist die Orientierung der Holzfasern im erzeugten Span, da diese zumindest in Teilen vom gewählten Zerspanungsverfahren abhängt und letztlich die mechanischen Eigenschaften in den Hauptmaterialrichtungen von Spanplatten mit beeinflusst. Wie bereits im Kapitel 2.1.2 aufgeführt, sind laut Niemz und Wenk (1989) die Holzfasern in Spanlängsachse ausgerichtet. Dieser Zusammenhang wurde bisher jedoch nicht im Detail untersucht und ist neben dem angewandten Zerspanungsverfahren abhängig davon, ob Rundholz direkt oder etwa Hackschnitzel zerspannt werden. Bei der Zerspanung von Rundholz parallel zur Stammlängsachse, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Orientierung der Fasern im erzeugten Spangut der Spanlängsachse folgt. Bei der Zerspanung von Hackschnitzeln im Messerringzerspaner hingegen, ist davon auszugehen, dass durch die beliebige Ausrichtung der Hackschnitzel beim Auftreffen auf die Messer, die Holzfasern im Span willkürlicher orientiert sind und nicht zwangsläufig der Spanlängsachse folgen. Bedingt durch die richtungsabhängigen Festigkeiten des Holzes, die in Faserrichtung um ein Vielfaches höher sind als quer hierzu, ist die Orientierung der Holzfasern in Spanlängsachse jedoch, insbesondere bei brechender bzw. mahlender Zerkleinerung, wahrscheinlich. Zur Verdeutlichung sind in Tabelle 2 nach Kollmann (1951) für in der deutschen Spanplattenproduktion üblicherweise eingesetzte Holzarten (Fichte und Kiefer) mittlere Zug- und Druckfestigkeiten (bei 12 % Holzfeuchte) parallel (||) bzw. quer (\perp) zur Faser aufgeführt.

Tabelle 2 Gegenüberstellung der Zug- bzw. Druckfestigkeiten (bei 12 % Holzfeuchte) parallel (||) und quer zur Faser (\perp) von Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*). In Anlehnung an eine Übersicht von Kollmann (1951) (Anhang Tafel 5 (1. Teil) „Eigenschaften der wichtigsten Nutzhölzer“)

Holzart	Zugfestigkeit (N/mm ²)		Druckfestigkeit (N/mm ²)	
		\perp		\perp
Fichte (<i>Picea abies</i>)	88,3	2,6	49,0	2,8
Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>)	102,0	2,9	53,9	7,5

Die in Tabelle 2 aufgeführten Festigkeitswerte verdeutlichen, dass bei der mechanischen Beanspruchung von Holz, beispielsweise im Rahmen der Zerspanung oder bei der durch den Transport von Spänen im Spanplattenprozess hervorgerufenen Nachzerkleinerung, der Bruch vornehmlich parallel zur Faser erfolgt und damit eine Tendenz der Orientierung der Holzfasern parallel zur Spanlängsachse vorliegt. In diesem Zusammenhang beschreibt May (1982), dass sich eine längliche Spanform im Rahmen der Nachzerkleinerung von Spänen in erster Linie durch die richtungsabhängigen Festigkeiten des Holzes ergibt, die in Faserrichtung am höchsten sind.

2.4 Verfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie

Seit Erfindung der Spanplatte wurden verschiedenste Messverfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie entwickelt. Benthien et al. (2022a) geben eine Übersicht der Verfahren mit Beispielgeräten (Abbildung 1). Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden beschrieben, wobei nur im Falle der 3D-Lasertechnik das aufgeführte Beispielgerät genauer vorgestellt wird, da dieses für die eigenen Forschungsarbeiten genutzt wurde.

Verfahren	Methode	Beispielgeräte
Händische Vermessung		Messschieber, Dickentaster
Siebanalyse		„Plansiebmaschine AS 400 Control“ (Retsch GmbH; Haan, D)
2D Bildanalyse	Mit Ablage der Späne auf einer ebenen Fläche	„Fibreshape automatic“ (IST AG; Vilters, CH) „Haver CPA 4 Conveyor“ (Haver & Böcker OHG; Oelden, D)
	Ohne Ablage der Späne auf einer ebenen Fläche (freier Fall)	„Camsizer“ (Microtrac Retsch GmbH; Haan, D); „QicPic“ (Sympatec GmbH; Clausthal-Zellerfeld, D)
3D Bildkonstruktion	Ohne Ablage der Späne auf einer ebenen Fläche (freier Fall)	„Partimac 3D XL“ (BASF SE; Ludwigshafen, D)
3D Lasertechnik		„3D Particleview“ (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG.; Alfeld, D)

Abbildung 1 Messverfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie mit Gerätebeispielen.

Übernommen aus Benthien et al. (2022a, S. 541)

Händische Vermessung

Die händische Vermessung von Spänen mittels Messschieber bzw. Dickentaster ist insbesondere in der Forschung, aber auch im industriellen Kontext, ein gängiges Verfahren und ermöglicht die stichprobenartige Bestimmung der Spanlänge, -breite und -dicke. Das Verfahren ist sehr

zeitaufwendig, sodass in der Regel kleinere Stichproben von ca. 50–100 Spänen vermessen werden. Der Bedienerinfluss ist einerseits durch die manuelle Stichprobenziehung und andererseits durch beispielsweise den Anpressdruck bei der Bedienung des Messschiebers als hoch einzuschätzen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der händischen Vermessung aufgrund des oftmals sehr geringen Stichprobenumfangs nicht gesichert repräsentativ sind.

Siebanalyse

Ein weiteres Verfahren zur Charakterisierung von Spänen ist die Siebanalyse mit Hilfe eines Siebturms, dessen Siebe von unten nach oben an Maschenweite zunehmen. In Industrie und Forschung ist die Analysesiebung mit dem Maschinensiebverfahren nach DIN 66165-1: 2022-06 (Grundlagen) bzw. DIN 66165-2: 2016-08 (Durchführung) gängig. Als Ergebnis werden nach Wägung der Siebrückstände aus den einzelnen Sieben des Siebturms, deren Massenanteile bestimmt. Basierend hierauf können die Massenverteilung bzw. Massenanteilsverteilung und kumulative Summenverteilung dargestellt werden. Weiter kann als Ergebnis für die einzelnen Siebfractionen die Spangröße (Kapitel 2.1.1) angegeben werden. Das Klassierungskriterium bei der Siebung ist die Siebmaschenweite. Damit ein Span das Sieb passiert, müssen die Abmessungen in zwei seiner Hauptachsen kleiner als die Siebmaschenweite sein. Weiter muss die Spanform ein Passieren der Siebmasche zulassen. Folglich können von der Siebung keine direkten Rückschlüsse auf konkrete Abmessungen eines Spans gezogen werden. Nach Dunky und Niemz (2002) lassen sich die Spanabmessungen jedoch anhand von Korrelationen mit der Siebmaschenweite mit begrenzter Genauigkeit ableiten. So korrelieren beispielsweise laut May (1973) die Spanlänge und -breite gut mit der Siebmaschenweite. Dies lässt sich für die Spandicke nicht bestätigen. Auch Benthien et al. (2019a) untersuchen den Zusammenhang von Spanabmessungen und der Siebmaschenweite. Aus der graphischen Auftragung der Mittelwerte der Spanabmessung gegen die Mitte der Spangrößenintervalle der Siebanalyse lässt sich ableiten, dass alle Spanabmessungen positiv linear mit dem Spangrößenintervall korrelieren, wobei am ehesten nach der Spanbreite klassiert wird (Winkelhalbierende). Die aufgeführten Korrelationen sind jedoch nur eingeschränkt übertragbar. Je nach Siebverfahren und Siebbewegung (z. B. rein horizontal oder horizontal und vertikal) ist auch bei der Verwendung von ein und demselben Siebsatz sowie der Untersuchung desselben Spanmaterials davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Fraktionierung voneinander abweichen.

2D-Bildanalyse

2D-Bildanalyseverfahren bedienen sich digitaler Kameratechnik und erlauben bei Ablage der Späne auf einer ebenen Fläche die automatisierte Bestimmung von Spanlänge und -breite, nicht aber der Spandicke (Benthien et al., 2022a). Entsprechende Messgeräte können in der Spanplattenproduktion über dem Formband eingesetzt werden, um auch im laufenden Prozess Daten zur Spanlänge bzw. -breite zu generieren. Werden 2D-Bildanalyseverfahren auf frei fallende Späne angewendet, sind die bestimmten Spanabmessungen, je nach Ausrichtung der Späne im Raum, nur bedingt präzise und lassen sich nicht eindeutig den Hauptachsen der Späne zuordnen (Benthien et al., 2022a).

3D-Bildkonstruktion

Mit Hilfe der 3D-Bildkonstruktion können unter Einsatz mehrerer Digitalkameras die Spanabmessungen frei fallender Späne näherungsweise bestimmt werden. Auch hier besteht die Problematik, dass aufgrund der freien Ausrichtung der Späne im Raum, die Ergebnisse nur bedingt die tatsächlichen Spanabmessungen widerspiegeln. (Benthien et al., 2022a)

3D-Lasertechnik

Messverfahren zur Bestimmung der Spanabmessungen mit Hilfe von 3D-Lasertechnik bedienen sich dem Messprinzip der Lasertriangulation. Entsprechende Messgeräte arbeiten mit einem Laser-Profilsensor, der nach Vereinzelung der Späne auf einem Förderband für jeden einzelnen Span ein Höhenprofil erfasst. Mit Bezug zur Förderbandebene können über die Höhenprofile die Spanlänge,- breite und -dicke für umfangreiche Spanproben voll automatisiert bestimmt werden. Weiter können über Algorithmen auch die Spanoberfläche und das Spanvolumen näherungsweise berechnet werden.

Das in Abbildung 1 für die 3D-Lasertechnik aufgeführte Beispielgerät soll an dieser Stelle detaillierter vorgestellt werden, da es, wie einleitend erwähnt, für die eigenen Forschungsarbeiten genutzt wurde. Seit 2020 ist das Messgerät 3D Particleview (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG.; Alfeld, Deutschland) als Laborgerät am Markt erhältlich und wird heutzutage unter dem Namen Particleview 3D geführt. Zur Vermessung einer Spanprobe wird diese auf eine Vibrationsrinne am Messgerät aufgegeben. Über insgesamt zwei Vibrationsrinnen werden die Späne vereinzelt, auf einem Förderband abgelegt und unter einem Laser-Profilsensor mit 1280 Profildatenpunkten auf einer Messbreite von 130 mm hindurchgeführt. Wie zuvor beschrieben, wird von jedem einzelnen Span ein Höhenprofil erzeugt. Die Auflösung in Förderbandebene beträgt 100 µm, die

Auflösung senkrecht hierzu 20 µm. Die Gerätesoftware gibt vollautomatisch Informationen zur Spanlänge, -breite und -dicke sowie zur Spanoberfläche und dem Spanvolumen aus. Die Spanabmessungen werden nach verschiedenen Prinzipien bestimmt und ausgegeben. Beispielsweise kann die Spanlänge einerseits als Länge des kleinstmöglichen den Einzelspan umgebenden Rechtecks interpretiert werden. Andererseits kann die Spanlänge als skelettierte, tatsächliche Länge des Spans ausgegeben werden. Bei einem gekrümmten Span würde dieser Wert die Länge des kleinstmöglichen den Einzelspan umgebenden Rechtecks überschreiten. Als Spandicke kann zum Beispiel die maximale Spandicke oder die mittlere über alle Höhenpunkte eines Spans gebildete Dicke ausgegeben werden. Grundsätzlich können sowohl Einzelwerte für jeden Span oder beispielsweise Mittelwerte der Spanabmessungen für die Gesamtprobe angezeigt werden.

2.5 Einfluss der Spangeometrie auf die Schütt- und Mattendichte sowie die Ausprägung des Rohdichteprofiles

Die Schüttdichte (auch Streudichte) eines Spangutes ist definiert als Quotient aus Masse und Volumen einer Ansammlung gestreuter, zufällig orientierter Späne (Niemz & Sandberg, 2022). Bei konstanter Rohdichte und Feuchtigkeit der Späne, bestimmt die Spangeometrie die Schüttdichte eines Spangutes (Dunky & Niemz, 2002). Niemz und Sandberg (2022) grenzen begrifflich von der Schüttdichte die Mattendichte ab, welche sie als Quotient aus Masse und Volumen einer Matte aus in einer Ebene gestreuter, zufällig orientierter Späne definieren, die zu einer Platte verpresst werden sollen. Weiter geben sie für verschiedene im Spanplattenprozess genutzte Spanmaterialien eine Übersicht der Schütt- bzw. Mattendichte. In Anlehnung hieran sind Wertebereiche bzw. Werte für verschiedene Spanmaterialien, von grob (Mittelschichtspäne) nach fein (Schleifstaub) gegliedert, in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Auflistung von üblichen Schütt- und Mattendichten für im Spanplattenprozess genutzte Spanmaterialien (gegliedert von grob (Mittelschicht) nach fein (Schleifstaub)). In Anlehnung an eine tabellarische Übersicht von Niemz und Sandberg (2022, S. 386)

Spanmaterial	Schüttdichte (kg/m ³)	Mattendichte (kg/m ³)
Mittelschichtspäne	110–120	145
Deckschichtspäne (Normal)	50–60	70
Deckschichtspäne (Fein)	120–130	150
Schleifstaub	160–200	200

Aus Tabelle 3 geht einerseits hervor, dass die Mattendichte in der Regel etwas höher als die Schüttdichte ist. Andererseits lässt sich ableiten, dass die Schütt- bzw. Mattendichte (sofern Parameter wie Feuchte, Rohdichte etc. konstant sind) nicht ausschließlich von der Spangröße, sondern vielmehr von den Abmessungsverhältnissen bzw. der Spanform abhängt. Würden diese ausschließlich von der Spangröße abhängen, dann müssten die Werte für Schütt- und Mattendichte vom groben Spanmaterial (Mittelschichtspäne) hin zum feinen Spanmaterial (Schleifstaub) durchweg zunehmen.

Zum Einfluss einzelner Spanabmessungen bzw. der Spanform auf die Schüttdichte kommen Studien zu folgenden Ergebnissen. Niemz und Wenk (1989) stellen fest, dass die Schüttdichte mit zunehmender Spanlänge abnimmt. Analog hierzu berichten Niemz und Sandberg (2022), dass auch die Mattendichte mit zunehmender Spanlänge abnimmt. Röllig et al. (2024) stellen fest, dass die Schüttdichte mit zunehmendem Schlankheitsgrad (durch Erhöhung der Spanlänge) abnimmt. Für eine Zunahme der Spanbreite stellen Niemz und Wenk (1989) ebenfalls eine Abnahme der Schüttdichte fest, während diese nach ihren Angaben mit zunehmender Spandicke steigt. Bezüglich der Spandicke kommen Benthien et al. (2019b) zu gegenteiligen Ergebnissen, die jedoch nicht durchweg statistisch signifikant sind. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Schüttdichte mit Erhöhung einzelner Spanabmessungen tendenziell abnimmt.

Weiter trägt die Spangeometrie indirekt zur Ausprägung des Rohdichteprofiles bei, da mit ihr auch der Verdichtungswiderstand (Widerstand, den die Spanmatte ihrer Verdichtung entgegensetzt) variiert. So kommen Benthien et al. (2018) zu dem Schluss, dass der Verdichtungswiderstand einerseits auf die zur Verdichtung notwendige Veränderung der Spanform, sowie die tatsächlichen Verdichtung der Holzsubstanz zurückzuführen ist. Den Einfluss der Spangeometrie auf die Ausprägung des Rohdichteprofiles verdeutlichen Untersuchungen von Sackey et al. (2008) an dreischichtigen Spanplatten, die aus unterschiedlichen Spangemischen, bei ansonsten konstanten Produktionsparametern, hergestellt wurden. Hier zeigten verschiedene Plattentypen mit einer Dichte von 650 kg/m^3 , in Abhängigkeit des in Deck- bzw. Mittelschicht verwendeten Spangemisches, deutlich unterschiedliche Ausprägungen des Rohdichteprofiles.

2.6 Bedeutung der Spangeometrie bei der Beleimung von Spänen

Die Spangeometrie spielt im Rahmen der Beleimung von Spänen eine entscheidende Rolle, da der Klebstoff auf die Spanoberfläche aufgebracht wird, die sich aus den Spanabmessungen und der Spanform ergibt. Aufgrund des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses geometrischer Körper

hat eine Spanprobe feinen Spanmaterials bei konstanter Holzrohddichte im Vergleich zu einer massengleichen (bzw. volumengleichen) Spanprobe groben Spanmaterials eine höhere Gesamtoberfläche. Mit anderen Worten sinkt mit Erhöhung der Spanabmessungen die spezifische Oberfläche einer Spanprobe. Im industriellen Spanplattenprozess sowie in den meisten vorliegenden Studien zum Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften, werden die Späne massenspezifisch beleimt. Die Berechnung des Klebstoffanteils erfolgt dabei meist als Masse an Klebstoff (Feststoff) bezogen auf die Masse absolut trockener Späne. In diesem Fall führt eine Veränderung der Spangeometrie, die mit einer Änderung der spezifischen Spanoberfläche einhergeht, unweigerlich zu einer Variation der oberflächenbezogenen Klebstoffmenge, welche wiederum die Platteneigenschaften mit beeinflusst, wie auch Dunky (1988) und Niemz und Wenk (1989) anmerken. Bei der Untersuchung des Einflusses der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften, ist also ein oberflächenbezogener Leimauftrag von entscheidender Bedeutung.

2.7 Einfluss der Spangeometrie auf ausgewählte Eigenschaften von Spanplatten

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Untersuchungen, die sich speziell oder neben anderen Aspekten mit dem Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten befassen. Vor dem Hintergrund, dass ca. 95 % des für die Spanplattenproduktion genutzten lignocellulosehaltigen Materials Holz ist (Thoemen et al., 2010), werden in den folgenden Unterkapiteln (2.7.1–2.7.3) ausschließlich Studien berücksichtigt, die den Einfluss der Spangeometrie anhand von Spanplatten untersuchen, die im Wesentlichen aus Holz und einem gängigen Bindemittel wie beispielsweise Harnstoff-Formaldehyd bestehen. Die eigenen Publikationen, die dieser Dissertation zugrunde liegen, werden mit aufgeführt, jedoch erst in Kapitel 4 genauer eingeordnet. Der Fokus liegt, wie in den eigenen Untersuchungen, auf dem Einfluss der Spangeometrie auf Biegefestigkeit, Biege-E-Modul, Querkzugfestigkeit, Dickenquellung und Wasserabsorption. Es wird klar zwischen Untersuchungen unterschieden, in denen die Späne massenspezifisch bzw. oberflächenspezifisch beleimt werden. Für eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse dieser Studien werden diese, nach den untersuchten Einflussgrößen, die unter dem Begriff der Spangeometrie zusammengefasst sind, namentlich Spangröße, -länge, -breite, -dicke und -form, unterschieden. Dies erfolgt in den folgenden Unterkapiteln (2.7.1–2.7.3) durch Zwischenüberschriften.

Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten aus alternativen Rohstoffen untersuchen, werden aufgrund fehlender Vergleichbarkeit zu den eigenen Untersuchungen nicht im Detail behandelt. Der Vollständigkeit halber sind diese in Tabelle 4, nach dem für die Spanplatten verwendeten alternativen Hauptrohstoff gegliedert, aufgelistet.

Tabelle 4 Auflistung von Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten aus alternativen Rohstoffen untersuchen. Alphabetische Gliederung nach dem verwendeten Hauptrohstoff

Hauptrohstoff	Autor (Jahr)
Bagasse	Iswanto et al. (2018); Nazerian und Eghbal (2013)
Bambus	Bazzetto et al. (2019); Iswanto (2018); Kasim et al. (2000)
Bambus und Bagasse	Iswanto und Ompusunggu (2019)
Baumwollstängel	Nguyen et al. (2020)
Dattelpalmenwedel	Hegazy und Ahmed (2015)
Erdnussschalen	Cheng et al. (2016)
Hanfschäben	Fehrmann et al. (2022); Zvirgzds et al. (2022)
Kenafstängel	Juliana et al. (2012)
Ölpalmenstamm	Hashim et al. (2010); Kasim et al. (2010); Saari et al. (2012); Sudin et al. (1995)
Ölpalmenwedel	Yunus et al.
Palmbblattspindeln	Ferrandez-Garcia et al. (2020)
Polystyrolschaum (und Holz)	Akinyemi et al. (2019)
Rattanmöbel-Abfall	Ahmad et al. (2019)
Reishülsen	Osarenmwinda und Nwachukwu (2007)
Reisstroh	Li et al. (2010)
Rhizome	Ferrandez-Villena et al. (2020)
Rinde	Blanchet et al. (2008); Gupta et al. (2011)
Rinde (und Holz)	Yemele et al. (2008)
Samenschalen (Ölkamelie)	Chaydarreh et al. (2022a); Chaydarreh et al. (2022b)
Schnittgut von Palmen	Ferrández-García et al. (2018)
Sonnenblumenkernschalen	Cosereanu et al. (2015)
Sorghum-Biomasse	Sutiawan et al. (2024)
Weizenstroh und Maismark	Wang und Sun (2002)

Ebenfalls keine Berücksichtigung finden Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von bindemittelfreien oder zementgebundenen Spanplatten untersuchen, welche in Tabelle 5 aufgelistet sind. Im Vergleich zu Tabelle 4 kann es zu wiederholter Nennung einzelner Studien kommen, wenn in einer Studie zum Beispiel bindemittelfreie Spanplatten aus alternativen Rohstoffen untersucht wurden.

Tabelle 5 Auflistung von Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von bindemittelfreien oder zementgebundenen Spanplatten untersuchen

Bindungsart	Autor (Jahr)
Bindemittelfrei	Ahmad et al. (2019); Ferrandez-Villena et al. (2020); Hashim et al. (2010); Leng et al. (2017); Lui et al. (2018); Marashdeh et al. (2011); Saari et al. (2012)
Zementgebunden	Amiandamhen und Izekor (2013); Badejo (1988); Nasser et al. (2014); Nazerian et al. (2011); Nazerian und Eghbal (2013); Sudin et al. (1995)

2.7.1 Einfluss auf die Biegeeigenschaften

Spangröße

Viele Untersuchungen befassen sich mit dem Einfluss der Spangröße auf die Biegeeigenschaften von Spanplatten. Für einschichtige, massenspezifisch konstant beleimte Spanplatten wird in den meisten Arbeiten mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls festgestellt (Atta-Obeng et al., 2013; Kasim et al., 2018; Rahman, W. M. N. W. A. et al., 2019; Röllig et al., 2024). Atta-Obeng et al. (2013) begründen diesen Zusammenhang über die mit Erhöhung der Spangröße abnehmende spezifische Spanoberfläche, wodurch bei massenspezifisch konstanter Beleimung der oberflächenbezogene Klebstoffauftrag zunimmt. Zum gleichen Schluss kommen Kasim et al. (2018). Rahman, W. M. N. W. A. et al. (2019) liefern eine Begründung, die nur in Teilen für den gewählten Versuchsansatz zutreffen kann und erklären den Anstieg der Biegeeigenschaften mit Erhöhung der Spangröße unter anderem über eine Zunahme der Kontaktfläche zwischen den Spänen. Röllig et al. (2024) berufen sich auf den positiven Effekt des in deren Untersuchung mit Erhöhung der Spangröße zunehmenden Schlankheitsgrades auf die Biegeeigenschaften, wie er von Deppe und Ernst (2000) beschrieben wird. Kimoto et al. untersuchen den Einfluss der Spangröße nur auf die Biegefestigkeit und stellen ebenfalls eine Zunahme dieser mit Erhöhung der Spangröße fest. Miyamoto et al. (2002) hingegen stellen an

einschichtigen Platten aus drei unterschiedlichen Spanfraktionen keinen Einfluss der Spangröße auf Biegefestigkeit oder Biege-E-Modul fest.

Für einschichtige, massenspezifisch konstant beleimte Spanplatten aus unterschiedlich großen Sägespänen kommen Autoren zu widersprüchlichen Ergebnissen. Während Astari et al. (2018) eine Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls mit zunehmender Größe von Sägespäne feststellen, ohne diese konkret zu begründen, kommen Charoenwong und Pisuchpen zu gegenteiligen Ergebnissen. Charoenwong und Pisuchpen begründen die gefundenen Zusammenhänge damit, dass gröbere Partikel stärker miteinander verwoben wären als feine und sich dies positiv auf die Festigkeitseigenschaften auswirke.

Anhand von dreischichtigen, massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten stellen Istek et al. bei einer Erhöhung der Spangröße in Deck- und/oder Mittelschicht eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls fest, ohne die gefundenen Ergebnisse tiefergehend zu interpretieren. Analog hierzu stellen Schneider et al. (1982) bei Erhöhung der Spangröße in den Deckschichten dreischichtiger Platten ebenfalls eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls fest. Medved und Resnik (2003) kommen bei Erhöhung der Spangröße in den Deckschichten zu anderen Ergebnissen und finden eine Abnahme der Biegefestigkeit, die sie auf ein abnehmendes Verdichtungsverhältnis der Deckschichten (Verhältnis der Deckschichtdichte nach dem Pressen zur Deckschichtmattendichte vor dem Pressen) und abnehmende Deckschichtdichten zurückführen.

Zum Einfluss der Spangröße auf die Biegeeigenschaften von Spanplatten, bei deren Herstellung die Klebstoffmenge oberflächenspezifisch eingestellt wurde, konnte nach umfassender Literaturrecherche nur zwei relevante Quelle gefunden werden. So stellen Engehausen et al. (2025) (Publikation 2 (Kapitel 3.2)) anhand von einschichtigen, oberflächenspezifisch konstant beleimten Spanplatten mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls fest. Kitahara und Kasagi (1955) kommen anhand von einschichtigen, oberflächenspezifisch konstant beleimten Spanplatten aus quaderförmigen Spänen mit Erhöhung der Spangröße (bei konstanten Abmessungsverhältnissen) zu gleichen Ergebnissen. Kitahara und Kasagi begründen dies über eine mit zunehmender Spangröße abnehmende Anzahl an Bindungsstellen zwischen den Spänen pro Volumeneinheit, was bei Biegebeanspruchung zu einer frühzeitigen Konzentration von Spannungen führe. Insbesondere an den Enden grober Späne würden Spannungsspitzen entstehen, durch die es früher zum Bruchversagen kommt. Spanplatten aus feinen Spänen weisen laut den Autoren eine höhere Packungsdichte auf und sind homogener, wodurch

bei Beanspruchung Spannungen auf eine größere Anzahl von Kontaktstellen und damit gleichmäßiger verteilt werden können. Engehausen et al. (2024) (Publikation 1 (Kapitel 3.1)) stellen, ebenfalls an einschichtigen, oberflächenspezifisch konstant beleimten Spanplatten, bei Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls fest.

Spanlänge

Mehrere Untersuchungen befassen sich mit dem Einfluss der Spanlänge auf die Biegeeigenschaften einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten. Haselein et al. (2010) stellen für Plattentypen aus Spänen drei unterschiedlicher Spanlängen (40, 75, 110 mm), bei ansonsten konstanten Abmessungen, eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls mit zunehmender Spanlänge fest. Dies wird über eine Zunahme der wirksamen Kontaktflächen zwischen den Spänen sowie einen höheren oberflächenbezogenen Klebstoffauftrag begründet, der sich bei Erhöhung der Spanlänge einstellt. Niemz (1982) kommt für Spanplatten aus Spänen (hergestellt aus Kiefern furnieren) unterschiedlicher Längen (bis 100 mm) zu vergleichbaren Ergebnissen und begründet dies ebenfalls über die Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen den Spänen. Turner (1954) stellt für Spanplatten mit einem Klebstoffanteil von 4 % mit Erhöhung der Spanlänge eine Zunahme der Biegefestigkeit fest. Zu gleichen Ergebnissen kommen Brumbaugh (1960) und Liiri et al. (1977) bei Variation der Spanlänge (12,7, 25,4, 50,8, 101,0 mm (aus Inch umgerechnet) bzw. 15, 30, 45 mm). Brumbaugh führt aus, dass die größere Spanoberfläche längerer Späne mehr Scherspannung aufnehmen bzw. ableiten kann und durch längere Späne Bereiche überbrückt werden, in denen das Biegemoment am höchsten ist. Liiri et al. merken an, dass eine Erhöhung der Spanlänge nur im Falle dünner Späne die Biegefestigkeit positiv beeinflusst. Auch für dreischichtige Spanplatten findet Liiri (1960) mit Erhöhung der Spanlänge in Deck- bzw. Mittelschicht eine Zunahme der Biegefestigkeit.

Zum Einfluss der Spanlänge auf die Biegeeigenschaften von Spanplatten, bei deren Herstellung die Klebstoffmenge oberflächenspezifisch eingestellt wurde, konnte nach umfassender Literaturrecherche nur eine relevante Quelle gefunden werden. Post (1958) findet mit Erhöhung der Spanlänge (12,7, 25,4, 50,8, 101,0 mm (aus Inch umgerechnet)) für einschichtige Spanplatten eine Zunahme der Biegefestigkeit und weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass dieser Einfluss immer in Kombination mit dem Einfluss der Spandicke (Schlankheitsgrad (Spanlänge/Spandicke)) betrachtet werden sollte.

Spanbreite

Zum Einfluss der Spanbreite auf die Biegeeigenschaften von Spanplatten, bei deren Herstellung die Späne massenspezifisch konstant beleimt wurden, liegen nur wenige Studien vor, was darauf zurückzuführen ist, dass die Spanbreite im Herstellungsprozess von Spänen schwer kontrollierbar ist. Niemz (1982) stellt Späne für die Herstellung einschichtiger Spanplatten aus Kiefern Furnieren her und kontrolliert die Breite durch manuellen Zuschnitt der Furniere mit einer Furnierschere. Für eine stufenweise Erhöhung der Spanbreite bis ca. 25 mm stellt er eine Abnahme der Biegefestigkeit fest. Liiri (1960) kommt für dreischichtige Spanplatten bei Erhöhung der Spanbreite in Deck- bzw. Mittelschicht zu gegenteiligen Ergebnissen.

Spandicke

Zum Einfluss der Spandicke auf die Biegeeigenschaften einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten liegen verschiedene Studien vor, die zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Niemz und Schweitzer (1990) stellen eine Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Spandicke im Bereich von 0,2–0,8 mm fest. Niemz (1982) findet für Biegefestigkeit und Biege-E-Modul ein Maximum bei einer Spandicke von 1 mm, weist aber darauf hin, dass viele Autoren mit Erhöhung der Spandicke eine stete Abnahme der Biegefestigkeit feststellen, die unter anderem auf den höheren Verdichtungswiderstand dickerer Späne und damit höhere Deckschichtdichten zurückzuführen sei. Turner (1954) stellt ein Maximum der Biegefestigkeit bei einer Spandicke von 0,46 mm (0,018 Inch) fest. Brumbaugh (1960) findet bei einer Erhöhung der Spandicke (0,23, 0,30, 0,38, 0,46 mm (aus Inch umgerechnet)) keinen signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit. Zum gleichen Ergebnis kommen Benthien et al. (2019b) bei Variation der Spandicke in der Mittelschicht dreischichtiger, massenspezifisch beleimter Spanplatten. Liiri (1960) stellt für eine Erhöhung der Spandicke in den Deckschichten dreischichtiger, massenspezifisch beleimter Platten eine Abnahme der Biegefestigkeit fest. Zu gleichen Ergebnissen kommen Walter et al. (1979) für dreischichtige, orientiert gestreute Spanplatten bei Variation der Spandicke (0,25, 0,35, 0,45 und 0,60 mm).

Post (1958) stellt an einschichtigen, oberflächenspezifisch konstant beleimten Spanplatten aus Eichenspänen mit Erhöhung der Spandicke (0,15, 0,30, 0,60, 1,20 mm (aus Inch umgerechnet)) eine Abnahme der Biegefestigkeit fest.

Spanform

In den meisten Studien, die sich mit dem Einfluss der Spanform auf die Biegeeigenschaften von massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten befassen, wird der Schlankheitsgrad als Einflussgröße genauer betrachtet. Viele Untersuchungen an einschichtigen Spanplatten kommen zu dem Ergebnis, dass mit zunehmendem Schlankheitsgrad die Biegefestigkeit und, sofern untersucht, der Biege-E-Modul zunehmen (Arabi et al., 2011; Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Rackwitz, 1963). Brumbaugh (1960) führt genauer aus, dass die Biegefestigkeit sowohl über eine Erhöhung des Schlankheitsgrades durch Erhöhung der Spanlänge, als auch eine Erhöhung des Schlankheitsgrades durch Reduktion der Spandicke erreicht werden kann. Er stellt für die Biegefestigkeit ein Maximum bei einem Schlankheitsgrad von 250 fest. Für Schlankheitsgrade von 250–300 bleibt die Biegefestigkeit nach seinen Untersuchungen auf einem Niveau. Rackwitz (1963) betrachtet anhand einschichtiger Spanplatten auch das Breitenverhältnis und stellt für dieses keinen nennenswerten Einfluss auf die Biegeeigenschaften fest.

Post (1958) findet für einschichtige, oberflächenspezifisch konstant beleimte Spanplatten aus Eichenspänen mit Erhöhung des Schlankheitsgrades bis auf einen Wert von 300 eine Zunahme der Biegefestigkeit. Er merkt wie Brumbaugh (1960) an, dass die Erhöhung der Biegefestigkeit durch einen erhöhten Schlankheitsgrad sowohl durch Reduktion der Spandicke als auch Erhöhung der Spanlänge zu erreichen ist.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Biegeeigenschaften konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden.

2.7.2 Einfluss auf die Querkzugfestigkeit

Spangröße

Die meisten Studien, die sich mit dem Einfluss der Spangröße auf die Querkzugfestigkeit einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten befassen, stellen mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Querkzugfestigkeit fest (Astari et al., 2018; Kasim et al., 2018; Lias et al., 2014; Miyamoto et al., 2002; Röllig et al., 2024). Kasim et al. (2018) begründen die besseren Querkzugeigenschaften von Spanplatten aus feinen Spänen über eine höher Packungsdichte und damit bessere Bindung zwischen den Spänen. Kimoto et al. stellen diesen Zusammenhang nur für flächige Späne fest. Nach deren Untersuchungen anhand von Platten aus nadel-förmigen Spänen nimmt die Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spangröße zu. Rahman, W.

M. N. W. A. et al. (2019) stellen bei Erhöhung der Spangröße keinen signifikanten Einfluss auf die Querkzugfestigkeit fest.

Für dreischichtige, massenspezifisch beleimte Platten finden Schneider et al. (1982) mit Erhöhung der Spangröße in Deck- bzw. Mittelschicht einen Anstieg der Querkzugfestigkeit. Istek et al. stellen eine Zunahme der Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spangröße in der Mittelschicht dreischichtiger Platten fest.

Engehausen et al. (2024) (Publikation 1 (Kapitel 3.1)) und Engehausen et al. (2025) (Publikation 2 (Kapitel 3.2)) stellen anhand einschichtiger, oberflächenspezifisch konstant beleimter Spanplatten mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Querkzugfestigkeit fest.

Spanlänge

Zwei Studien, die sich mit dem Einfluss der Spanlänge auf die Querkzugfestigkeit einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten befassen, kommen zu gleichen Ergebnissen. So sinkt nach Brumbaugh (1960) und Liiri et al. (1977) die Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spanlänge (12,7, 25,4, 50,8, 101,0 (aus Inch umgerechnet) mm bzw. 15, 30, 45 mm). Brumbaugh führt aus, dass kurze Späne und deren unstete Verteilung in der horizontalen Plattenebene die Querkzugeigenschaften begünstigen könnten. Hierdurch könne die Tendenz zur Ausbildung großflächiger Schwachstellen in der horizontalen Plattenebene verringert werden. Haselein et al. (2010) hingegen, stellen bei analogen Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss der Spanlänge (40, 75, 110 mm) fest. Walter et al. (1979) finden für orientiert gestreute dreischichtige, massenspezifisch beleimte Platten mit Erhöhung der Spanlänge (30, 50, 80 mm) in den Deckschichten und der Mittelschicht wie Brumbaugh (1960) und Liiri et al. (1977) eine Abnahme der Querkzugfestigkeit.

Spanbreite

Zum Einfluss der Spanbreite auf die Querkzugfestigkeit konnte nach ausführlicher Literaturrecherche nur eine Studie gefunden werden. So stellt Niemz (1982) anhand einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten ein Maximum der Querkzugfestigkeit bei einer Spanbreite von ca. 12 mm fest. Im Bereich von 0 bis ca. 12 mm Spanbreite nimmt hiernach die Querkzugfestigkeit leicht zu, während sie im Bereich von 12–27 mm deutlich abnimmt.

Spandicke

Studien, die sich mit dem Einfluss der Spandicke auf die Eigenschaften von einschichtigen, massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten befassen, kommen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. So stellt Brumbaugh (1960) mit Erhöhung der Spandicke (0,23, 0,30, 0,38, 0,46 mm (aus Inch umgerechnet)) eine Zunahme der Querkzugfestigkeit fest. Er begründet dies einerseits mit dem bei massenspezifisch konstanter Beleimung zunehmendem oberflächenbezogenen Klebstoffauftrag. Andererseits führt er an, dass für dickere Späne ein höherer Verdichtungsdruck nötig ist, um eine bestimmte Plattendichte zu erreichen, was eine bessere Verbindung der Späne untereinander zur Folge hat. Haselein et al. (2010) kommen für eine Erhöhung der Spandicke von 0,5 auf 1 mm zu gegenteiligen Ergebnissen und berufen sich dabei auf die höhere Homogenität der Platten aus dünneren Spänen, die die Querkzugeigenschaften positiv beeinflussen. Liiri et al. (1977) stellen, ausschließlich für Platten mit im Vergleich zur Holzrohndichte niedriger Plattendichte, eine Zunahme der Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spandicke (0,30, 0,60, 0,90, 1,25 mm) fest. Niemz (1982) findet für einen Bereich der Spandicke von 0,7–1,5 mm ein Maximum der Querkzugfestigkeit bei einer Spandicke von ca. 1,1 mm. Für dreischichtige, orientiert gestreut und massenspezifisch beleimte Platten stellen Walter et al. (1979) eine Zunahme der Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spandicke (0,25, 0,35, 0,45, 0,60 mm) in den Deckschichten und der Mittelschicht fest. Benthien et al. (2019b) stellen bei Erhöhung der Spandicke in der Mittelschicht für massenspezifisch beleimte Platten mit einer Dichte von 500 kg/m^3 ebenfalls eine Zunahme der Querkzugfestigkeit fest und weisen auf die mit der Spandicke zunehmende oberflächenbezogene Klebstoffmenge hin. Für Platten mit einer Dichte von 650 kg/m^3 kommen sie zu gegenteiligen Ergebnissen.

Spanform

In mehreren Studien wurde der Einfluss des Schlankheitsgrades auf die Eigenschaften einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten untersucht. All diese Studien kommen zu dem Ergebnis, dass mit Erhöhung des Schlankheitsgrades die Querkzugfestigkeit abnimmt (Arabi et al., 2011; Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Rackwitz, 1963). Brumbaugh (1960) führt genauer aus, dass dies der Fall ist, wenn die Erhöhung des Schlankheitsgrades durch eine Erhöhung der Spanlänge erfolgt, nicht aber, wenn diese durch eine Reduktion der Spandicke herbeigeführt wird. Für eine Erhöhung des Breitenverhältnisses von 4 auf 6, findet Rackwitz (1963) eine leichte Zunahme der Querkzugfestigkeit. Die Verwendung schmalere Späne bringe keinen nennenswerten Vorteil.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Querkzugfestigkeit konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden.

2.7.3 Einfluss auf die Sorptionseigenschaften

Spangröße

Die meisten Untersuchungen zum Einfluss der Spangröße auf die Sorptionseigenschaften einschichtiger, massenspezifisch beleimter Spanplatten kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Mit Erhöhung der Spangröße nimmt demnach die Dickenquellung und, sofern untersucht, auch die Wasserabsorption zu (Astari et al., 2018; Atta-Obeng et al., 2013; Charoenwong & Pisuchpen; Kasim et al., 2018; Miyamoto et al., 2002; Rahman, W. M. N. W. A. et al., 2019; Röllig et al., 2024). Begründet wird die Zunahme von Dickenquellung bzw. Wasserabsorption mit Erhöhung der Spangröße oftmals über eine hiermit zunehmende Größe von Hohlräume zwischen den Spänen bzw. eine höhere Porosität, die die Diffusion von Wasser erleichtert (Atta-Obeng et al., 2013; Charoenwong & Pisuchpen; Kasim et al., 2010). Kimoto et al. kommen zu anderen Ergebnissen und stellen sowohl für die Dickenquellung als auch die Wasserabsorption eine leichte Abnahme mit Erhöhung der Spangröße fest. Röllig et al. (2024) finden interessanterweise neben der Zunahme der Dickenquellung mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Wasserabsorption. Dies erklären sie mit der zunehmenden Benetzung der Spanoberfläche mit Klebstoff, die sich bei massenspezifischer Beleimung und Erhöhung der Spangröße einstellt. Hierdurch sei die Zugänglichkeit der Holzsubstanz für die Wasseraufnahme begrenzt. An dreischichtigen, massenspezifisch beleimten Spanplatten finden Istek et al. eine Zunahme von Dickenquellung und Wasserabsorption mit Erhöhung der Spangröße in den Deckschichten oder der Mittelschicht, ohne die gefundenen Ergebnisse genauer zu interpretieren. Schneider et al. (1982) hingegen stellen, ebenfalls anhand dreischichtiger, massenspezifisch beleimter Spanplatten, bei Variation der Spangröße keinen Einfluss auf Dickenquellung bzw. Wasserabsorption fest.

Kitahara und Kasagi (1955) finden für einschichtige, oberflächenspezifisch konstant beleimte Spanplatten mit Erhöhung der Spangröße (bei konstanten Abmessungsverhältnissen) eine Zunahme von Dickenquellung und Wasserabsorption. Engehausen et al. (2025) (Publikation 2 (Kapitel 3.2)) kommen, ebenfalls für einschichtige, oberflächenspezifisch konstant beleimte Spanplatten, mit Erhöhung der Spangröße zu gleichen Ergebnissen. Kitahara und Kasagi (1955) führen diesen Zusammenhang auf die größeren Hohlräume und eine damit leichtere Zugänglichkeit für Wasser von Platten aus gröberen Spänen zurück.

Spanlänge

Mit Erhöhung der Spanlänge (12,7, 25,4, 50,8, 101,0 mm (aus Inch umgerechnet) bzw. 0–100 mm) finden Brumbaugh (1960) und Niemz (1982) an einschichtigen, massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten eine Abnahme der Dickenquellung. Brumbaugh (1960) stellt diesen Zusammenhang auch für die Wasserabsorption fest und begründet dies über den größeren Anteil an Stirnflächen kürzerer Späne, über die das Wasser am schnellsten aufgenommen werden kann. Liiri et al. (1977) beschreiben, dass die Spanlänge (15, 30, 45 mm) auf die Dickenquellung kaum einen Einfluss habe. An dreischichtigen, massenspezifisch beleimten Spanplatten stellt Liiri (1960) mit Erhöhung der Spanlänge in den Deckschichten bzw. der Mittelschicht eine Abnahme der Dickenquellung fest, was sich mit den Ergebnissen von Brumbaugh (1960) und Niemz (1982) deckt.

Spanbreite

Anhand einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten stellt Niemz (1982) eine Abnahme der Dickenquellung mit Erhöhung der Spanbreite im Bereich von ca. 3–25 mm fest. Er begründet dies über eine bessere Fixierung von Spänen größerer Breite (und Länge). Liiri (1960) kommt für eine Erhöhung der Spanbreite in den Deckschichten bzw. der Mittelschicht dreischichtiger, massenspezifisch beleimter Spanplatten zum gleichen Ergebnis.

Spandicke

Mehrere Studien zum Einfluss der Spandicke auf die Sorptionseigenschaften einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten kommen zu ähnlichen Ergebnissen. So finden Brumbaugh (1960), Liiri et al. (1977) und Niemz (1982) eine Zunahme der Dickenquellung mit Erhöhung der Spandicke (0,23, 0,30, 0,38, 0,46 mm; 0,30, 0,60, 0,90, 1,25 mm (aus Inch umgerechnet); 0,7–1,5 mm). Brumbaugh (1960) stellt in diesem Zusammenhang auch eine Zunahme der Wasserabsorption fest. Er begründet die gefundenen Zusammenhänge über eine verstärkte Rückverformung, die aus einer höheren Verdichtung bzw. Verformung dickerer Späne resultiert. Darüber hinaus führt er an, dass Platten aus dickeren Spänen größere Hohlräume aufweisen, die die Zugänglichkeit für Wasser erhöhen. Benthien et al. (2019b) stellen an dreischichtigen, massenspezifisch beleimten Platten mit einer Dichte von 650 kg/m^3 eine Zunahme der Dickenquellung mit Erhöhung der Spandicke in der Mittelschicht fest. Für Platten mit einer Dichte von 500 kg/m^3 finden sie dabei keinen Einfluss. Liiri (1960) stellen, ebenfalls an dreischichtigen,

massenspezifisch beleimten Platten, mit Erhöhung der Spandicke in den Deckschichten eine Abnahme der Dickenquellung fest.

Spanform

Brumbaugh (1960) stellt an einschichtigen, massenspezifisch konstant beleimten Platten mit Erhöhung des Schlankheitsgrades (Spanlänge/Spandicke) bis auf einen Wert von 150 eine Abnahme von Dickenquellung und Wasserabsorption fest. Die Dickenquellung und Wasserabsorption können nach seinen Ausführungen reduziert werden, wenn die Erhöhung des Schlankheitsgrades durch eine Erhöhung der Spanlänge erfolgt. Liiri et al. (1977) kommen, ebenfalls anhand einschichtiger, massenspezifisch konstant beleimter Platten, zu vergleichbaren Ergebnissen, während Rackwitz (1963) in diesem Zusammenhang eine Zunahme der Dickenquellung feststellt. Die Wasserabsorption bleibt laut Rackwitz vom Schlankheitsgrad unbeeinflusst. Mit Erhöhung des Breitenverhältnisses (Spanlänge/Spanbreite) stellt er ebenfalls keinen nennenswerten Einfluss auf die Dickenquellung fest.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Sorptionseigenschaften konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden.

2.8 Einfluss der Spangeometrie auf die Porenstruktur von Spanplatten

Die Spangeometrie hat Einfluss auf Anzahl und Volumen der Hohlräume zwischen den Spänen einer Spanplatte, die in dieser Arbeit als interpartikuläre Hohlräume bezeichnet und unter dem Begriff Porenstruktur zusammengefasst werden. Diese Hohlräume sind klar von den natürlich im Holz vorkommenden Poren wie Zelllumina oder etwa Gefäßen im Laubholz zu unterscheiden. Bei konstanter Rohdichte des eingesetzten Holzes und einheitlicher Zieldichte einer Spanplatte, steigt mit Erhöhung der Spangröße die Größe, genauer das mittlere Volumen, interpartikulärer Hohlräume bzw. die Porosität der Platte (Atta-Obeng et al., 2013). Die Porosität wird hier als das Verhältnis des Gesamthohlraumvolumens (inkl. natürlicher Poren) zum Gesamtvolumen der Spanplatte definiert. In den eigenen Untersuchungen, die der dritten zur Publikation vorgesehenen Arbeit (Kapitel 3.3) zugrunde liegen, wird die Porosität zum Teil unter Ausschluss natürlicher Poren als Verhältnis vom Gesamtvolumen interpartikulärer Hohlräume zum Gesamtvolumen der Spanplatten berechnet und angegeben.

Ähnlich wie Atta-Obeng et al. (2013) stellen Chaydarreh et al. (2022b) für einschichtige Spanplatten aus Ölkamelienschalen und Eukalyptusholz (*Eucalyptus grandis x urophylla*) eine Zunahme des Volumens interpartikulärer Hohlräume sowie der Porosität fest. Brumbaugh (1960) führt aus, dass das Volumen interpartikulärer Hohlräume mit Erhöhung der Spandicke zunehme. Auch Li et al. (2009) stellen bei Simulationen der Hohlraumstruktur strand-basierter Holzwerkstoffe eine Zunahme der Größe interpartikulärer Hohlräume mit Erhöhung der Stranddicke fest.

3 Zusammenfassung der für diese Dissertation herangezogenen Publikationen sowie eines zur Veröffentlichung eingereichten Manuskriptes

3.1 Publikation 1: Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards (Engehausen et al. (2024) *Fibers*, 12(4), 32)

Deutscher Titel: Einfluss der Spangröße auf die mechanischen Eigenschaften von einschichtigen Spanplatten.

Die Forschungsarbeit, auf der diese Veröffentlichung (Publikation 1) basiert, zielte darauf ab, anhand zwei extremer Spangrößen den Einfluss der Spangröße auf die mechanischen Platteneigenschaften zu untersuchen. Anders als in bisherigen Studien wurden methodische Störgrößen wie etwa ein variierender Klebstoffgehalt in Bezug auf die Spanoberfläche gezielt ausgeschlossen, um den Einfluss der Spangröße zu isolieren. Ergänzend wurde der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge untersucht. Nicht in dieser Zusammenfassung aufgeführte Untersuchungsdetails (z. B. Stichprobenumfänge) sind der Publikation 1 im Anhang zu entnehmen.

Für die Untersuchung wurden einschichtige Spanplatten mit homogenem Rohdichteprofil aus feinen (Deckschicht-) Spänen bzw. groben (Mittelschicht-) Spänen hergestellt. Die oberflächenspezifische Klebstoffmenge wurde dabei, basierend auf der laserbasierten 3D-Vermessung der Spanoberfläche, gezielt eingestellt. Um angesichts der begrenzten Auflösung des Laserprofilensors eine vollständige Vermessung der feinen (Deckschicht-) Späne sicherzustellen, wurden diese zunächst mit einem Siebeinsatz der Maschenweite 1 mm abgesiebt. Für die Vermessung bzw. Untersuchung wurden ausschließlich Späne herangezogen, die vom Siebeinsatz zurückgehalten wurden. Die Ergebnisse der Spanvermessung sind in Tabelle 6 dargestellt. Als Spanlänge ist hier die skelettierte Länge, als Spanbreite die maximale Breite und als Spandicke die mittlere über alle vom Sensor erfassten Höhenpunkte eines Spans gebildete Dicke zu verstehen. In Abhängigkeit der Sensorauflösung, die je nach Messrichtung variiert (Benthien et al., 2022a), sind die Mittelwerte für Spanlänge und -breite auf eine Nachkommastelle bzw. für die Spandicke auf zwei Nachkommastellen genau angegeben.

Tabelle 6 Ergebnisse der 3D-Vermessung der abgeseibten Deckschichtspäne sowie Mittelschichtspäne, aus denen die in der Untersuchung betrachteten Plattentypen hergestellt wurden

Spanmaterial	Spanlänge* (mm)	Spanbreite* (mm)	Spandicke* (mm)	Spezifische Spanoberfläche (mm ² /g)
Deckschichtspäne	2,0 ± 0,9	0,9 ± 0,3	0,23 ± 0,09	9734
Mittelschichtspäne	3,6 ± 2,7	1,1 ± 0,8	0,33 ± 0,26	6389

* Mittelwert ± Standardabweichung

Zur Realisierung des homogenen Rohdichteprofils wurden die Platten in einer computergesteuerten Laborpresse kalt verdichtet und anschließend die Temperatur der Pressbleche über eine Stunde stetig erhöht, bis im Kern der Platte eine Temperatur von mindestens 100 °C erreicht wurde. Die Zieldichte aller Plattentypen beträgt bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte 650 kg/m³, während sich die Zieldicke auf 15 mm beläuft. Weitere Details zu den jeweils in dreifacher Ausführung hergestellten Plattentypen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7 Details zu den in Publikation 1 untersuchten Plattentypen

Plattentyp	Spanmaterial	Klebstoffanteil	Oberflächenspez. Klebstoffmenge (g/m ²)
1	Deckschichtspäne	8 %	12,5
2	Mittelschichtspäne	8 %	8,2
3	Mittelschichtspäne	12,2 %	12,5
4	Deckschichtspäne	5,3 %	8,2

Für alle Plattentypen wurden anhand normgerechter Prüfkörper die Biegefestigkeit, der Biege-E-Modul (DIN EN 310:1993-08) und die Querkzugfestigkeit (DIN EN 319:1993-08) bestimmt. Anhand des Vergleichs der Eigenschaften der Plattentypen 1 und 3 sowie 2 und 4 konnte der Einfluss der Spangröße abgeleitet werden, da für diese die oberflächenspezifische Klebstoffmenge konstant gehalten wurde. Anhand des Vergleichs der Eigenschaften der Plattentypen 1 und 4 bzw. 2 und 3 konnte der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge abgeleitet werden, da hier die Spangröße konstant gehalten wurde.

Mit Erhöhung der Spangröße wurde, bei konstanter oberflächenspezifischer Klebstoffmenge, eine statistisch signifikante Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls festgestellt. Gegenteiliges zeigte sich für die Querkzugfestigkeit. Mit Erhöhung der oberflächenspezifischen

Klebstoffmenge nahmen, bei konstanter Spangröße, die Biegefestigkeit, der Biege-E-Modul und die Querkzugfestigkeit statistisch signifikant zu.

Die gefundenen Ergebnisse werden in der hier zusammengefassten Publikation über ein Zusammenspiel aus einer spangrößen- bzw. spanformabhängige Orientierung der Späne in der Platte und die von der holzanatomischen Richtung abhängigen Festigkeiten erklärt. Eine tiefere Diskussion dieses Erklärungsansatzes erfolgt in Kapitel 4.2.1.

3.2 Publikation 2: Investigation on the Influence of Particle Size and Surface-Specific Adhesive Amount on Mechanical Properties and Sorption Behavior of Particleboard (Engehausen et al. (2025) European Journal of Wood and Wood Products, 83(3), 123)

Deutscher Titel: Untersuchung des Einflusses der Spangröße und oberflächenspezifischen Klebstoffmenge auf die mechanischen Eigenschaften und das Sorptionsverhalten von Spanplatte

Die Forschungsarbeit, auf der diese Veröffentlichung (Publikation 2) basiert, zielte darauf ab, den Einfluss der Spangröße sowie der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge auf die mechanischen Eigenschaften und das Sorptionsverhalten von Spanplatten genauer zu untersuchen. Wie in der unter Kapitel 3.1 zusammengefassten Veröffentlichung wurden auch hier bekannte Einflussgrößen gezielt ausgeschlossen, um den Einfluss der Spangröße bzw. oberflächenspezifischen Klebstoffmenge zu isolieren. Im Gegensatz zur zuvor genannten Veröffentlichung, in der nur zwei extreme Spangrößen betrachtet wurden, erfolgte die vorliegende Untersuchung anhand mehrerer Spanfraktionen unterschiedlicher Spangröße. Nicht in dieser Zusammenfassung aufgeführte Untersuchungsdetails (z. B. Stichprobenumfänge) sind der Publikation 2 im Anhang zu entnehmen.

Industrielle Mittelschichtspäne dienten als Ausgangsmaterial und Referenz. Aus diesen wurden mit Hilfe einer Taumelsiebmaschine verschiedene Spanfraktionen hergestellt. Für die Untersuchung wurden aus dem Referenzmaterial sowie den unterschiedlichen Siebfraktionen mit einer Spangröße von 1–1,5 mm, 1,5–2 mm, 2–3 mm und 3–4 mm einschichtige Spanplatten mit homogenem Rohdichteprofil hergestellt. Die oberflächenspezifische Klebstoffmenge wurde dabei, basierend auf der laserbasierten 3D-Vermessung der Spanoberfläche, gezielt eingestellt. Die Ergebnisse der 3D-Spanvermessung sind in Tabelle 8 dargestellt. Die für Spanlänge, -breite und -dicke dargestellten Werte entsprechen der Beschreibung aus Kapitel 3.1.

Tabelle 8 Ergebnisse der 3D-Vermessung des Referenzmaterials sowie der Spanfraktionen, aus denen die in der Untersuchung betrachteten Plattentypen hergestellt wurden

Spanmaterial	Spanlänge* (mm)	Spanbreite* (mm)	Spandicke* (mm)	Spezifische Spanoberfläche (mm ² /g)
Referenz	4,1 ± 3,1	1,3 ± 0,8	0,38 ± 0,29	6043
1–1,5 mm	3,4 ± 1,8	1,1 ± 0,4	0,29 ± 0,15	9424
1,5–2 mm	4,5 ± 2,4	1,6 ± 0,5	0,47 ± 0,20	7340
2–3 mm	5,8 ± 3,2	2,3 ± 0,7	0,71 ± 0,28	5276
3–4 mm	6,3 ± 4,5	1,9 ± 1,3	0,56 ± 0,43	4558

* Mittelwert ± Standardabweichung

Die Realisierung des homogenen Rohdichteprofiles erfolgte analog zu der unter Kapitel 3.1 beschriebenen Vorgehensweise. Die Zieldichte aller Plattentypen beträgt bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte 650 kg/m³, während sich die Zieldicke auf 15 mm beläuft. Weitere Details zu den jeweils in dreifacher Ausführung hergestellten Plattentypen sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9 Details zu den in Publikation 2 untersuchten Plattentypen

Plattentyp	Spanmaterial	Klebstoffanteil	Oberflächenspez. Klebstoffmenge (g/m ²)
1	Referenz	8 %	13,2
2	1–1,5 mm	12,5 %	13,2
3	1,5–2 mm	9,7 %	13,2
4	2–3 mm	7 %	13,2
5	3–4 mm	6 %	13,2
6	1–1,5 mm	8 %	8,5
7	1,5–2 mm	8 %	10,9
8	2–3 mm	8 %	15,2
9	3–4 mm	8 %	17,6
10	Referenz	5,1 %	8,5
11	Referenz	6,6 %	10,9
12	Referenz	9,2 %	15,2
13	Referenz	10,6 %	17,6

Für alle Plattentypen wurden anhand normgerechter Prüfkörper die Biegeeigenschaften (DIN EN 310:1993-08), die Querkzugfestigkeit (DIN EN 319:1993-08) und die Dickenquellung nach 2 und 24 Stunden (DIN EN 317:1992-08) bestimmt. Ergänzend wurde die zugehörige prozentuale

Wasserabsorption berechnet. Anhand des Vergleichs der Eigenschaften der Plattentypen 1–5 sowie der paarweisen Vergleiche der Plattentypen 6 und 10, 7 und 11, 8 und 12 und 9 und 13 konnte der Einfluss des Spanmaterials bzw. der Spangröße abgeleitet werden, da hier die oberflächenspezifische Klebstoffmenge konstant gehalten wurde. Anhand des Vergleichs der Eigenschaften der Plattentypen 1 und 10–13 sowie der paarweisen Vergleiche der Plattentypen 2 und 6, 3 und 7, 4 und 8 und 5 und 9 konnte der Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge abgeleitet werden, da hier die Spangröße konstant gehalten wurde. Zur Untersuchung des Einflusses der Spangröße wurden vornehmlich die Plattentypen 2–4 herangezogen, da die Spanvermessungsdaten im Falle der Siebfraction mit einer Spangröße von 3–4 mm auf eine Siebüberladung hindeuten. Details hierzu sind der Publikation 2 im Anhang zu entnehmen.

Mit Erhöhung der Spangröße wurde, bei konstanter oberflächenspezifischer Klebstoffmenge, eine statistisch signifikante Abnahme der Biegeeigenschaften und Querkzugfestigkeit festgestellt. Gegenteiliges zeigte sich für die Dickenquellung und Wasserabsorption nach 2 bzw. 24 Stunden. Mit Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge nahmen, bei konstanter Spangröße, die Biegefestigkeit, der Biege-E-Modul und die Querkzugfestigkeit statistisch signifikant zu. Gegenteiliges zeigte sich für die Dickenquellung und Wasserabsorption nach 2 bzw. 24 Stunden.

In der vorliegenden Untersuchung wird die Abnahme der mechanischen Eigenschaften mit zunehmender Spangröße auf die Annahme zurückgeführt, dass Platten aus groben Spänen im Vergleich zu Platten aus feinen Spänen tendenziell größere interpartikuläre Hohlräume aufweisen. Diese könnten die Konzentration von Spannungen im Belastungsfall begünstigen und schließlich zu einem frühzeitigen Versagen beitragen. Der beobachtete Anstieg von Dickenquellung und Wasserabsorption mit zunehmender Spangröße wird ebenfalls durch diese Theorie gestützt, da größere Hohlräume die Bindung zwischen den Spänen schwächen und die Aufnahme größerer Wassermengen ermöglichen.

3.3 Eingereichtes Manuskript: X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation

Deutscher Titel: Röntgen-mikrocomputertomographische Untersuchung der Porenstruktur von Spanplatten und deren Einfluss auf die mechanischen Platteneigenschaften in FEM-Simulationen

Die Forschungsarbeit, auf der dieses Manuskript basiert, zielte darauf ab, die Porenstruktur von Spanplatten und deren Einfluss auf die mechanischen Platteneigenschaften genauer zu untersuchen. In Publikation 2 (Kapitel 3.2) wurde mit zunehmender Spangröße eine signifikante Abnahme der Biegefestigkeit, des Biege-E-Moduls und der Querkzugfestigkeit festgestellt. Daraufhin wurde die Hypothese aufgestellt, dass Spanplatten aus groben Spänen im Vergleich zu Spanplatten aus feinen Spänen größere interpartikuläre Hohlräume aufweisen, die unter Belastung zu einer verstärkten Konzentration von Spannungen beziehungsweise Spannungsspitzen führen und damit letztlich das Versagen einer Spanplatte begünstigen. Um diese Hypothese zu überprüfen und die strukturellen Ursachen der in Publikation 2 (Kapitel 3.2) beobachteten Eigenschaftsänderungen genauer zu untersuchen, wurden μ CT-Scans an Plattenproben durchgeführt, die aus denselben Laborspanplatten entnommen wurden wie jene, die auch für die mechanischen Laborprüfungen in Publikation 2 herangezogen wurden. Die 3D-Bilddaten wurden hinsichtlich der Porenstruktur der Proben analysiert und in FEM-Modelle überführt, um verschiedene Belastungsfälle sowie die daraus resultierenden Spannungen und E-Module zu simulieren. Nicht in dieser Zusammenfassung aufgeführte Untersuchungsdetails (z. B. exakte Ergebniswerte) sind dem zur Veröffentlichung eingereichten Manuskript im Anhang zu entnehmen.

Für die Untersuchungen wurden drei Plattentypen (Tabelle 9; Plattentyp 2, 3 und 4) mit einheitlicher oberflächenspezifischer Klebstoffmenge ($13,2 \text{ g/m}^2$) aus Spanfraktionen variierender Spangröße (1–1,5 mm, 1,5–2 mm, 2–3 mm) herangezogen. Aus dem Randbereich von Biegeprüfkörpern, die aus der Mitte dieser Platten entnommen und für die Bestimmung der Biegeeigenschaften in Publikation 2 (Kapitel 3.2) verwendet wurden, wurden kubische Prüfkörper ($15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times \text{Plattendicke}$) zugeschnitten. Nach Konditionierung der Prüfkörper auf $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 % rel. Luftfeuchte wurde deren gravimetrische Dichte bestimmt (DIN EN 323:1993-08). Je Plattentyp wurden drei der kubischen Prüfkörper mit einer Dichte von $630 \text{ kg/m}^3 \pm 5 \%$ für die Untersuchungen herangezogen.

Die anhand der Prüfkörper angefertigten μ CT-Scans, wurden einerseits für die Analyse der Porenstruktur der Proben eingesetzt, wobei Porenvolumenverteilungen und weitere Strukturparameter wie die Porenanzahl, das totale und mittlere Porenvolumen sowie die Gesamtporosität betrachtet wurden. Andererseits wurden die μ CT-Scans in ein FEM-Modell überführt, um Dreipunkt-Biegebelastungen und Zugbelastungen in allen Hauptmaterialrichtungen sowie die daraus resultierenden Spannungen und E-Module zu simulieren.

Anhand der Untersuchungen konnte die eingangs aufgestellte Hypothese validiert werden. Mit zunehmender Spangröße nimmt die Porosität (die hier unter Ausschluss kleiner bzw. natürlich im Holz vorkommender Poren berechnet wurde) und das mittlere Volumen interpartikulärer Hohlräume zu. Die Zunahme der Porosität und des mittleren Volumens interpartikulärer Hohlräume führt in den simulierten Belastungsfällen zu einer verstärkten Spannungskonzentration in den Querschnittsbereichen um größere Hohlräume und zu erhöhten Spannungsspitzen. Über alle simulierten Belastungsfälle hinweg nimmt die Anzahl der Spannungsspitzen mit zunehmender Spangröße zu. Zudem nehmen die zugehörigen simulierten E-Module mit Erhöhung der Spangröße ab. Folglich geben die Untersuchungsergebnisse Aufschluss über die strukturellen Ursachen der in Publikation 2 (Kapitel 3.2) mit Erhöhung der Spangröße festgestellten Abnahme der mechanischen Platteneigenschaften.

4 Diskussion

Ausgehend von der übergeordneten Forschungsfrage nach dem Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten werden in der folgenden Diskussion zunächst methodische Einflussfaktoren diskutiert, die entscheidend für die Ergebnisinterpretation und Zusammenführung bestehender Untersuchungen und der eigenen Forschungsarbeiten sind. In diesem Zuge werden auch Limitationen aufgezeigt, die sich aus den gewählten Versuchsansätzen bestehender und der eigenen Untersuchungen ergeben. Anschließend werden die wesentlichen Aspekte des aktuellen Forschungsstandes aufgegriffen, der Erkenntnisgewinn aus den eigenen Studien eingeordnet und die Gesamtergebnisse zusammenführend diskutiert.

4.1 Methodische Einflussfaktoren und deren Bedeutung für die Interpretation des Einflusses der Spangeometrie

4.1.1 Bestehende Untersuchungen

Für die Ergebnisinterpretation von Studien zum Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften müssen methodische Einflussfaktoren, die aus den gewählten Versuchsansätzen resultieren, einbezogen werden. Im Wesentlichen sind hier zu nennen:

- die Art des Plattenaufbaus (einschichtig oder dreischichtig),
- die Ausprägung des Rohdichteprofiles,
- und die Art der Klebstoffdosierung (massenspezifisch oder oberflächenspezifisch).

Wie aus den Ausführungen in den Kapiteln 2.7.1–2.7.3 hervorgeht, wird im größten Teil der bestehenden Studien zum Einfluss der Spangeometrie, in denen Spanplatten aus Holz und gängigen Bindemitteln untersucht werden, ein einschichtiger Plattenaufbau gewählt. Ein dreischichtiger Plattenaufbau, wie er in einigen Studien herangezogen wird (z. B. von Istek et al.) führt beispielsweise bei Variation der Spangeometrie in der Mittelschicht zu einer Variation des Verdichtungswiderstandes dieser Schicht (Benthien et al., 2018), was wiederum die resultierende Deckschichtdichte bzw. Ausprägung des Rohdichteprofiles und damit die Platteneigenschaften maßgeblich mitbeeinflusst (Wong et al., 1999). Ein mehrschichtiger Plattenaufbau ist somit für die Ermittlung von Grundzusammenhäng zwischen der Spangeometrie und den Platteneigenschaften ungeeignet.

Ein ausgeprägtes Rohdichteprofil kann, sofern nicht ohnehin mit untersucht, auch für den Großteil der einschichtigen Platten angenommen werden, die in den in Kapitel 2.7.1–2.7.3 genannten Studien untersucht wurden. Grund für diese Annahme sind die in den Versuchsansätzen gewählten kurzen Presszeiten bei hohen Pressdrücken und -temperaturen, die unweigerlich zu höheren Dichten in den Randbereichen und geringeren Dichten in der Plattenmitte führen (z. B. 30 s, 3 MPa und 180 °C (Liiri et al., 1977) oder 300 s, 2,94 MPa und 200 °C (Atta-Obeng et al., 2013)). Wie zuvor erwähnt wird die Ausprägung des Rohdichteprofiles, unter anderem von der Spangeometrie der eingesetzten Späne beeinflusst, da mit der Spangeometrie der Verdichtungswiderstand variiert. Somit kann auch im Falle einschichtiger Platten die Ausprägung des Rohdichteprofiles als überlagernde Störgröße bezeichnet werden, wenn die Grundzusammenhänge zwischen der Spangeometrie und den Platteneigenschaften das Untersuchungsziel darstellen.

Bis auf zwei Ausnahmen (Kitahara & Kasagi, 1955; Post, 1958) erfolgt der Klebstoffauftrag in allen im Rahmen der Literaturrecherche gefundenen Studien zum Einfluss der Spangeometrie massenspezifisch. Wie in Kapitel 2.6 beschrieben hat ein konstanter massenspezifischer Klebstoffauftrag bei Variation der Spangeometrie unweigerlich eine Variation des oberflächenbezogenen Klebstoffauftrags zur Folge. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2 für die in Publikation 2 (Kapitel 3.2) herangezogenen Spanmaterialien unterschiedlicher Spangröße, bei massenspezifisch konstanter Beleimung von 8 %, veranschaulicht. Hierbei wird, ungeachtet der Spangrößenverteilung innerhalb der einzelnen Spanfraktionen, von einer gleichmäßigen Klebstoffverteilung auf der Spanoberfläche ausgegangen. Das gezeigte Beispiel verdeutlicht wie stark die oberflächenspezifische Klebstoffmenge bei massenspezifisch konstanter Beleimung von Spangemischen unterschiedlicher Spangröße variieren kann. Neben Faktoren wie der Verdichtung der Spanmatte ist die oberflächenspezifische Klebstoffmenge entscheidend für die Vernetzung der Späne untereinander und damit auch für die Ausprägung der Platteneigenschaften. So findet beispielsweise Liiri (1960) bei Erhöhung des Klebstoffgehaltes, bei konstanter Spangröße, was logischerweise einen Anstieg der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge zur Folge hat, eine Zunahme von Biegefestigkeit und Querkzugfestigkeit sowie eine Abnahme der Wasserabsorption bzw. Längen- und Dickenquellung. Auch in den eigenen Untersuchungen aus Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) wurde mit Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge eine signifikante Zunahme der Biegefestigkeit, des Biege-E-Moduls und der Querkzugfestigkeit festgestellt, während Dickenquellung und Wasserabsorption signifikant abnahmen. Bei Untersuchungen, in denen Späne unterschiedlicher Geometrie massenspezifisch mit Klebstoff beaufschlagt werden, wird also der Einfluss der Spangeometrie vom Einfluss der

oberflächenspezifischen Klebstoffmenge auf die Platteneigenschaften überlagert. Eine Ableitung von Grundzusammenhängen zwischen Spangeometrie und Platteneigenschaften ist somit nicht möglich.

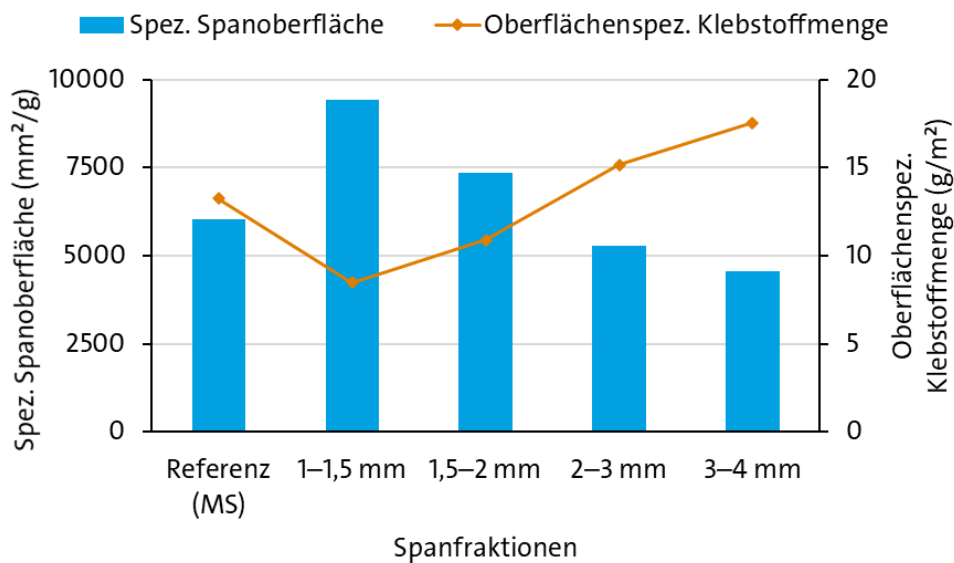


Abbildung 2 Ausprägung des oberflächenspezifischen Klebstoffauftrags bei massenspezifisch konstanter Beleimung (8 %) industrieller Mittelschichtspäne (MS) bzw. daraus gewonnener Siebfractionen unterschiedlicher Spangröße

Als Grund für die in vielen Studien gewählte massenspezifische Beleimung ist das lange Fehlen eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung der Spanoberfläche anzuführen, was die Voraussetzung für eine gezielte oberflächenspezifische Beleimung darstellt. Eine oberflächenspezifische Beleimung war lange nur für quaderförmige Späne bekannter Abmessungen und damit zuverlässig bestimmbarer Spanoberfläche möglich, wie Kitahara und Kasagi (1955) sie für ihre Untersuchungen heranzogen.

Das gewählte Verfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie ist für die Aussagekraft einer Untersuchung zum Einfluss dieser auf die Platteneigenschaften entscheidend. Ohne ein Charakterisierungsverfahren, das für die zur Plattenherstellung gewählten Spanmaterialien repräsentative Kennwerte zur Spangeometrie liefert, können keine belastbaren Aussagen zu Korrelationen zwischen beispielsweise einzelnen Spanabmessungen und den Platteneigenschaften getroffen werden. Die meisten der in Kapitel 2.4 aufgeführten Verfahren zur Spancharakterisierung bringen Nachteile mit sich. Erst seitdem Messgeräte wie der Particleview 3D (Markteinführung im Jahr 2020) verfügbar sind, mit denen nach dem Prinzip der Lasertriangulation mit Hilfe von

Laserprofilensoren die Spanabmessung sowie die Spanoberfläche und das Spanvolumen umfangreicher Spanproben voll automatisch bestimmt werden können, ist zielgerichtete Forschung zum Einfluss der Spangeometrie möglich. Hiermit lassen sich einerseits repräsentative Kennwerte für die Spanabmessungen generieren und andererseits auf Basis der Daten zur Spanoberfläche die oberflächenspezifische Klebstoffmenge für Späne unterschiedlicher Geometrien gezielt auf einem Niveau halten.

4.1.2 Eigene Untersuchungen

Für eine isolierte Betrachtung des Einflusses der Spangröße wurden in den eigenen Forschungsarbeiten, die Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen, die in Kapitel 4.1.1 diskutierten Störgrößen durch den gewählten Versuchsansatz ausgeschlossen. Zu diesem Zweck wurden einschichtige Laborspanplatten mit homogenem Rohdichteprofil, konstanter Zieldichte und Zieldicke aus unterschiedlichen Siebfraktionen hergestellt. Die oberflächenspezifische Klebstoffmenge wurde, nach Vermessung der Siebfraktionen unterschiedlicher Spangröße mit einem 3D-Spanvermessungsgerät, auf Basis der spezifischen Spanoberfläche für die unterschiedlichen Plattentypen konstant gehalten. Da die Plattendichte die Platteneigenschaften maßgeblich mitbeeinflusst (Plath, 1963), wurden in den eigenen Untersuchungen Festigkeits- und Sorptionskennwerte bei geringen Abweichungen der tatsächlichen Plattenroh-dichte von der Zielroh-dichte mithilfe einer linearen Regression entsprechend nach oben bzw. unten korrigiert.

Trotz dem beschriebenen Vorgehen zur Isolation des Einflusses der Spangröße, sind auch für die eigenen Untersuchungen einige Limitationen anzuführen, die bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen sind. Werden, wie in den Untersuchungen, die Publikationen 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen, Spanplatten mit einheitlicher Zieldicke aus Siebfraktionen unterschiedlicher Spangröße hergestellt, kann das Verdichtungsverhältnis (Mattendicke/Plattendicke) über die unterschiedlichen Plattentypen hinweg nicht konstant gehalten werden. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, variiert mit der Spangröße die Schütt- bzw. Mattendichte (Niemz & Sandberg, 2022) und damit auch die Mattendicke vor dem Pressen, was bei einheitlicher Zieldicke der Platten zu einer Veränderung des Verdichtungsverhältnisses (Mattendicke/Plattendicke) führt. Dieser Zusammenhang und eine damit einhergehende stärkere Verdichtung, die sich positiv auf die Platteneigenschaften auswirkt, könnte den Einfluss der Spangröße auf die Platteneigenschaften in Teilen überlagern. Laut Benthien (2022), der unter anderem die Eigenschaften von Spanplatten aus Spänen unterschiedlicher Schüttdichte untersuchte, liegt

hier jedoch kein nennenswerter Einfluss vor. Entscheidender sei der Quotient aus Plattendichte und Holzrohndichte der eingesetzten Späne, der von einigen Autoren ebenfalls als Verdichtungsverhältnis definiert wird. Für die eigenen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verhältnis annähernd konstant gehalten wurde, da einerseits industrielles Spanmaterial aus einer Charge und damit vermutlich annähernd einheitlicher Holzrohndichte verwendet und andererseits die Zieldichte der Platten konstant gehalten wurde.

Im Rahmen der Berechnung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge, die für die unterschiedlichen Siebfraktionen bzw. Spangrößen konstant gehalten werden sollte, wurde vereinfachend, ungeachtet der innerhalb jeder Fraktion vorliegenden Spangrößenverteilung, eine gleichmäßige Verteilung des Leims auf der Gesamtoberfläche der Späne angenommen. Benthien et al. (2022b) stellen für ein mit Phenolharz beleimtes Spangemisch bei mikroskopischen Untersuchungen des oberflächenbezogenen Klebstoffauftrags jedoch fest, dass die Oberflächenbedeckung mit Klebstoff bei feinen Spänen tendenziell höher ist als bei groben. Dieser Zusammenhang wurde in den eigenen Forschungsarbeiten nicht mit untersucht bzw. berücksichtigt.

Ein weiterer Aspekt, der in den eigenen Untersuchungen nicht mitberücksichtigt wurde, ist die Oberflächenstruktur der Späne. Im Rahmen der 3D-Spanvermessung wurde zwar die Spanoberfläche grundsätzlich mitbestimmt, die Oberflächenrauigkeit der Späne, der nach Niemz (1983) ein erheblicher Einfluss auf die Ausprägung der mechanischen Platteneigenschaften zukommt, konnte jedoch aufgrund der begrenzten Auflösung des Laserprofilsensors nur eingeschränkt mitberücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang fand Niemz (1983) beim Einsatz von Schlagspänen (eher raue Oberfläche) gegenüber Schneidspänen (eher glatte Oberfläche) entsprechender Spangeometrie eine Abnahme der Biegeeigenschaften um 60–70 %.

Auch für die dritte zur Publikation vorgesehene Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) lässt sich eine Limitation anführen. Die μ CT-Scans von Prüfkörpern verschiedener Plattentypen aus den der Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegenden Untersuchungen, wurden in binäre Datensätze umgewandelt. Im Rahmen der Segmentierung von Material (Holz) und Hohlräumen (Luft) wurden zunächst visuell Grenzwerte in den Histogrammen der Grauwertbilder gesetzt. Diese wurden zum Erhalt der Vergleichbarkeit für Prüfkörper unterschiedlicher Plattentypen konstant gehalten, obwohl die Histogramme der Grauwertbilder Unterschiede aufwiesen. Dies könnte bei der weiteren Auswertung der Datensätze eine Über- oder Unterschätzung des Material- bzw. Porenanteils zur Folge haben. Um den Bedienerinfluss auf die Ergebnisse bei der Zuordnung von Voxeln zum Material bzw. den Hohlräumen dennoch möglichst gering zu halten, wurde zwischen

den visuell am Histogramm festgelegten Bereichen für Material bzw. Hohlräume ein Bereich undefiniert gelassen und für diesen eine Zuordnung nach einem Watershed-Algorithmus vorgenommen.

4.2 Spangeometrie im Kontext ausgewählter Eigenschaften von Spanplatten

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse bestehender Untersuchungen zum Einfluss der Spangeometrie auf die betrachteten Eigenschaften von Spanplatten zusammengefasst und unter Einordnung der eigenen Untersuchungsergebnisse diskutiert. Der Fokus liegt hier auf der Einordnung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse aus Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2). Eine tiefere Diskussion der Untersuchungsergebnisse der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) erfolgt in Kapitel 4.3 und 4.4. Da in den eigenen Untersuchungen die Publikation 1 und Publikation 2 zugrunde liegen über verschiedene Plattentypen die Spangröße, nicht aber gezielt einzelne Spanabmessungen variiert wurden, können diese ausschließlich mit Ergebnissen bestehender Untersuchungen zum Einfluss der Spangröße auf die Platteneigenschaften direkt verglichen werden. Ein direkter Vergleich mit Untersuchungen zum Einfluss einzelner Spanabmessungen bzw. Formfaktoren auf die Platteneigenschaften kann demnach nicht vorgenommen werden.

Die folgenden Unterkapitel sind in Anlehnung an die Kapitel 2.7.1–2.7.3 nach den Begriffen Spangröße, Spanabmessungen und Spanform, durch Zwischenüberschriften untergliedert.

4.2.1 Biegeeigenschaften

Spangröße

Wie in Kapitel 2.7.1 ausführlich dargestellt, wird in den meisten Untersuchungen mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Biegefestigkeit und, sofern untersucht, auch des Biege-E-Modul festgestellt (Atta-Obeng et al., 2013; Kasim et al., 2018; Rahman, W. M. N. W. A. et al., 2019; Röllig et al., 2024). Hervorzuheben ist, dass in diesen Untersuchungen die Späne massenspezifisch beleimt werden und somit, wie in Kapitel 2.6 beschrieben, die oberflächenspezifische Klebstoffmenge mit Erhöhung der Spangröße zunimmt und damit den Einfluss der Spangröße überlagert. Die Zunahme der Biegeeigenschaften mit Erhöhung der Spangröße wird zum Teil sogar explizit über die bei massenspezifisch konstanter Beleimung zunehmende oberflächenspezifische Klebstoffmenge begründet (Atta-Obeng et al., 2013). Der positive Einfluss der

Klebstoffmenge ist zum Beispiel durch Untersuchungen von Liiri (1960) belegt. Auch in den eigenen Untersuchungen die Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen, wurde für unterschiedliche Plattentypen bei konstanter Spangröße mit Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge ein signifikanter Anstieg der Biegeeigenschaften nachgewiesen.

Kitahara und Kasagi (1955) untersuchen den Einfluss der Spangröße anhand von einschichtigen Spanplatten, bei deren Herstellung die Späne oberflächenspezifisch konstant beleimt werden. Sie stellen, im Gegensatz zu den Untersuchungen an massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten, mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls fest. Hier besteht direkte Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der eigenen Forschungsarbeiten, da sowohl für die in Publikation 1 (Kapitel 3.1) als auch Publikation 2 (Kapitel 3.2) untersuchten Plattentypen die oberflächenspezifische Klebstoffmenge bei Variation der Spangröße konstant gehalten wurde.

In den eigenen Untersuchungen anhand einschichtiger Spanplatten aus feinen (Deckschicht-) Spänen bzw. groben (Mittelschicht-) Spänen, die Publikation 1 (Kapitel 3.1) zugrunde liegen, wurde mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls festgestellt, was im Widerspruch zu den Ergebnissen von Kitahara und Kasagi (1955) steht. Der positive Einfluss einer Erhöhung der Spangröße auf die Biegeeigenschaften wird in Publikation 1 (Kapitel 3.1) auf ein Zusammenspiel aus einer spangrößen- bzw. spanformabhängige Orientierung der Späne in der Platte und die von der holzanatomischen Richtung abhängigen Festigkeiten erklärt. Nach dem aufgeführten Interpretationsansatz sollen größere Späne (mit höherem Schlankheitsgrad) die Tendenz haben mit der Längsachse in Plattenebene ausgerichtet zu sein, kleinere (mit geringerem Schlankheitsgrad) vermehrt auch mit der Längsachse quer zur Plattenebene. Nach Niemz und Wenk (1989) folgt die longitudinale anatomische Holzrichtung der Spanlängsachse, wodurch die höchsten Festigkeiten eines Spans in axialer Richtung zu erwarten sind. Im Zusammenhang mit der beschriebenen spanformabhängigen Orientierung könnte dies die mit zunehmender Spangröße bzw. zunehmendem Schlankheitsgrad der Späne ansteigenden Biegeeigenschaften erklären. Der gewählte Interpretationsansatz scheint jedoch nach Betrachtung der Gesamtergebnisse der Dissertation eher unwahrscheinlich, insbesondere vor dem Hintergrund, dass im Falle der Untersuchungen die Publikation 1 (Kapitel 3.1) zugrunde liegen der Schlankheitsgrad zwischen den feinen (Deckschicht-) Spänen und groben (Mittelschicht-) Spänen nur geringfügig variiert und sich auf 10,1 bzw. 12,9 beläuft.

Nach Betrachtung der Gesamtergebnisse lassen sich die in Publikation 1 (Kapitel 3.1) beobachteten Abweichungen von den Ergebnissen von Kitahara und Kasagi (1955) hinsichtlich des Einflusses der Spangröße auf die Biegeeigenschaften wie folgt interpretieren. In den eigenen Untersuchungen wurden die Deckschichtspäne vor Herstellung der Platten mit einem Taumelsieb und einem Siebeinsatz der Maschenweite 1 mm abgeseibt um sehr feine Späne zu entfernen. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass im Rahmen der laserbasierten Spanvermessung die Späne vom Sensor, dessen Auflösung begrenzt ist, vollumfänglich erfasst werden, die bestimmte spezifische Spanoberfläche für das Spanmaterial repräsentativ ist und eine gezielte Einstellung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge erfolgen kann. Bei genauer Betrachtung der Spanvermessungsdaten (die mit der Publikation veröffentlicht wurden) der abgeseibten Deckschichtspäne fällt auf, dass die maximale Breite sowie die maximale Dicke vieler Späne die Siebmaschenweite von 1 mm unterschreiten. In Kombination mit den Ausführungen zur Siebanalyse in Kapitel 2.4 deutet dies darauf hin, dass das Sieb beim Absieben der Deckschichtspäne überladen war. Dadurch verblieben auch nach dem Absieben sehr feine Späne im Spanmaterial, die bei der Spanvermessung vom Sensor nicht miterfasst wurden. Folglich wurde im Falle der Deckschichtspäne die spezifische Spanoberfläche unterschätzt, wodurch die oberflächenspezifische Klebstoffmenge für die feinen (Deckschicht-) Späne im Vergleich zu den groben (Mittelschicht-) Späne geringer eingestellt wurde. Demnach ist davon auszugehen, dass in den Untersuchungen die Publikation 1 (Kapitel 3.1) zugrunde liegen, der Einfluss der Spangröße auf die Biegeeigenschaften vom Einfluss der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge überlagert wurde. Vor diesem Hintergrund ist auch zu erklären, dass diese Ergebnisse denen von bestehenden Untersuchungen an massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten gleichen.

In den eigenen Untersuchungen anhand von einschichtigen Spanplatten aus industriellen Mittelschichtspänen bzw. mehreren durch Siebung daraus gewonnen Spanfraktionen unterschiedlicher Spangröße, die Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen, wurde wie bei Kitahara und Kasagi (1955) mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls festgestellt. Kitahara und Kasagi begründen diesen Zusammenhang über eine mit zunehmender Spangröße abnehmende Anzahl an Bindungsstellen zwischen den Spänen, was bei Biegebeanspruchung zu einer frühzeitigen Konzentration von Spannungen und letztlich ein Bruchversagen begünstigt. Umgekehrt weisen Spanplatten aus feineren Spänen eine höhere Packungsdichte und eine größere Anzahl von Kontaktstellen zwischen den Spänen auf, wodurch Spannungen gleichmäßiger verteilt werden. In Publikation 2 (Kapitel 3.2) wird eine ähnlicher Interpretationsansatz gewählt, nach dem mit Erhöhung der Spangröße die Größe interpartikulärer

Hohlräume zunimmt, wodurch es im Belastungsfall zur Konzentration von Spannungen bzw. Spannungsspitzen kommt, die das Versagen von Spanplatten begünstigen. Diese Zusammenhänge konnten mit der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) validiert werden.

Spanabmessungen

Mit Erhöhung der Spanlänge nimmt nach den meisten in Kapitel 2.7.1 zusammengefassten Untersuchungen anhand einschichtiger massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten die Biegefestigkeit und, sofern untersucht, auch der Biege-E-Modul zu (Brumbaugh, 1960; Haselein et al., 2010; Liiri et al., 1977; Niemz, 1982). Dies wird unter anderem über eine damit einhergehende Zunahme der wirksamen Kontaktfläche zwischen den Spänen (Haselein et al., 2010; Niemz, 1982), oder etwa eine bessere Ableitung von Scherkräften (Brumbaugh, 1960) begründet. Diese Interpretationsansätze erscheinen plausibel, da mit zunehmender Kontaktfläche auch die Anzahl wirksamer Klebeverbindungen zwischen den Spänen zunimmt, über die im Belastungsfall Scherspannungen abgeleitet bzw. gleichmäßiger über den Plattenquerschnitt verteilt werden können. Einschränkend muss auch hier erwähnt werden, dass der in den Studien gewählte massenspezifisch konstante Klebstoffauftrag bei Erhöhung der Spanlänge zu einer Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge führt, wodurch der Effekt der Spanlänge zumindest in Teilen überlagert wird.

Post (1958) stellt auch für Spanplatten bei deren Herstellung die Späne oberflächenspezifisch konstant beleimt werden mit Erhöhung der Spanlänge eine Zunahme der Biegefestigkeit fest, verweist aber genau wie Liiri et al. (1977) darauf, dass der positive Effekt der Spanlänge nur für geringe Spandicken zutreffe. Diese Ausführungen deuten darauf hin, dass dünne, längliche Späne die Biegeeigenschaften von Spanplatten begünstigen.

Zum Einfluss der Spanbreite auf die Biegeeigenschaften liegen nur wenige Untersuchungen an massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten mit zum Teil widersprüchlichen Ergebnissen vor, sodass sich hier keine eindeutigen Zusammenhänge ableiten lassen. Zudem wird auch in diesen Untersuchungen der Einfluss der Spanbreite durch den Einfluss der variierenden oberflächenspezifischen Klebstoffmenge überlagert. Eine Erhöhung der Spanbreite müsste jedoch, wie eine Erhöhung der Spanlänge, die Ausbildung von Kontaktflächen zwischen benachbarten Spänen bzw. eine wirksame Klebeverbindung zwischen diesen begünstigen, was sich positiv auf die Biegeeigenschaften auswirken dürfte.

Die in Kapitel 2.7.1 zusammengefassten Untersuchungen anhand massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten kommen in Bezug auf den Einfluss der Spandicke auf die Biegeeigenschaften zu unterschiedlichen Ergebnissen. Vor dem Hintergrund der Ausprägung von Kontaktflächen bzw. wirksamer Klebeverbindungen zwischen benachbarten Spänen müsste sich eine Erhöhung der Spandicke negativ auf die Biegeeigenschaften auswirken. Untersuchungen von Niemz und Schweitzer (1990) unterstützen diese Theorie.

Post (1958) stellt diesen Zusammenhang auch für Spanplatten fest, bei deren Herstellung die Späne oberflächenspezifisch konstant beleimt werden. Ergänzend zum aufgeführten Erklärungsansatz könnte dieser Zusammenhang auf eine mit Erhöhung der Spandicke zunehmende Größe interpartikulärer Hohlräume zurückzuführen sein, die die Konzentration von Spannungen im Belastungsfall und damit ein frühzeitiges Versagen begünstigt. Für diese Zusammenhänge sprechen auch die Untersuchungen der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3), in denen mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Größe interpartikulärer Hohlräume sowie daraus resultierende Spannungskonzentrationen festgestellt wurden.

Spanform

Die meisten Untersuchungen anhand von massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten kommen zu dem Schluss, dass die Biegeeigenschaften mit Erhöhung des Schlankheitsgrades der Späne zunehmen (Arabi et al., 2011; Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Rackwitz, 1963). Wie Brumbaugh (1960) führen mehrere Autoren aus, dass dieser Zusammenhang für eine Erhöhung des Schlankheitsgrades durch eine Erhöhung der Spanlänge und/oder eine Reduktion der Spandicke gilt.

Zum gleichen Schluss kommt Post (1958) auch für oberflächenspezifisch konstant beleimte Spanplatten. Diese Ergebnisse decken sich mit den zuvor diskutierten Zusammenhängen zwischen der Spanlänge bzw. Spandicke und den Biegeeigenschaften.

Das Breitenverhältnis hat nach Rackwitz (1963) keinen signifikanten Einfluss auf die Biegeeigenschaften. Erhöhen ließe sich das Breitenverhältnis über eine Erhöhung der Spanlänge und/oder eine Reduktion der Spanbreite. Nach den zum Einfluss der Spanabmessungen auf die Biegeeigenschaften gemachten Ausführungen, müsste eine Erhöhung des Breitenverhältnisses durch Erhöhung der Spanlänge die Biegeeigenschaften positiv beeinflussen. Gegenteiliges ist anzunehmen, wenn die Erhöhung des Breitenverhältnisses auf einer Reduktion der Spanbreite beruht.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Biegeeigenschaften konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden. Überträgt man die Ausführungen zum Einfluss der Spanabmessungen auf die Biegeeigenschaften auf einen möglichen Einfluss der Platttheit der Späne, so müssten mit Erhöhung dieser die Biegeeigenschaften positiv beeinflusst werden. Unabhängig davon, ob die Erhöhung der Platttheit auf eine Erhöhung der Spanbreite und/oder Reduktion der Spandicke zurückzuführen ist, müsste die Ausprägung von Kontaktflächen bzw. wirksamen Klebeverbindungen zwischen benachbarten Spänen und damit auch die Biegeeigenschaften begünstigt werden.

4.2.2 Querzugfestigkeit

Spangröße

Wie in Kapitel 2.7.2 ausführlich dargestellt, wird in den meisten Untersuchungen mit Erhöhung der Spangröße eine Abnahme der Querzugfestigkeit festgestellt (Astari et al., 2018; Kasim et al., 2018; Lias et al., 2014; Miyamoto et al., 2002; Röllig et al., 2024). Interessanterweise zeigt sich trotz massenspezifisch konstanter Beileimung und damit bei Erhöhung der Spangröße zunehmender oberflächenspezifischer Klebstoffmenge ein negativer Effekt größerer Späne auf die Querzugfestigkeit. Begründet wird dieser Effekt unter anderem von Kasim et al. (2018) über eine höhere Packungsdichte feiner Späne und damit bessere Verbindung der Späne untereinander. Umgekehrt kann geschlossen werden, dass grobe Späne und daraus resultierende größere Hohlräume zwischen den Spänen die Querzugfestigkeit negativ beeinflussen.

In den eigenen Untersuchungen, die Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen, wird analog zum Großteil der bestehenden Untersuchungen ebenfalls eine Abnahme der Querzugfestigkeit mit Erhöhung der Spangröße festgestellt. Insbesondere im Fall von Publikation 2 (Kapitel 3.2) wird der Einfluss anhand von Plattentypen aus Spänen unterschiedlicher Größe bei einheitlicher oberflächenspezifischer Klebstoffmenge dargestellt. Für Publikation 1 (Kapitel 3.1) gelten die in Kapitel 4.2.1 gemachten Einschränkungen. In Publikation 2 (Kapitel 3.2) wird die Abnahme der Querzugfestigkeit, genau wie die Abnahme der Biegeeigenschaften, mit Erhöhung der Spangröße auf die zunehmende Größe interpartikulärer Hohlräume und eine damit einhergehende Konzentration von Spannungen im Belastungsfall zurückgeführt, die ein frühzeitiges Bruchversagen von Spanplatten begünstigen. Mit den Untersuchungen, die der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) zugrunde liegen konnte dieser Zusammenhang validiert werden.

Spanabmessungen

Mit Erhöhung der Spanlänge nimmt nach den meisten Untersuchungen anhand massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten die Querkzugfestigkeit ab (Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Walter et al., 1979). Begründet wird dieser Zusammenhang von Brumbaugh (1960) über eine unstetere Verteilung kürzerer Späne gegenüber längerer Späne, die die Tendenz zur Ausbildung großflächiger Schwachstellen in der horizontalen Plattenebene verringert. Hier lassen sich Parallelen zu Untersuchungsergebnissen der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) erkennen, wo mit zunehmender Spangröße eine Zunahme der Größe interpartikulärer Hohlräume festgestellt wurde, was im Belastungsfall zur Konzentration von Spannungen führt und ein frühzeitiges Querkzugversagen begünstigen müsste.

Zum Einfluss der Spanbreite auf die Querkzugfestigkeit bestehen zu wenige Untersuchungen, um Grundzusammenhänge ableiten zu können. Beruft man sich auf den zum Einfluss der Spanbreite auf die Biegeeigenschaften aufgeführten Interpretationsansatz, müsste eine Erhöhung der Spanbreite die Querkzugfestigkeit erhöhen, da hierdurch die Ausbildung von Kontaktflächen zwischen benachbarten Spänen bzw. eine wirksame Klebeverbindung zwischen diesen begünstigt wird.

Für den Einfluss der Spandicke auf die Querkzugfestigkeit massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten kommen Autoren zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, sodass sich auch hier keine eindeutigen Zusammenhänge ableiten lassen. Die großen Unterschiede in den Ergebnissen bestehender Untersuchungen könnten auf die Überlagerung von zwei gegenläufigen Effekten zurückzuführen sein. Einerseits steigt mit Erhöhung der Spandicke bei massenspezifisch konstanter Beleimung die oberflächenspezifische Klebstoffmenge, was sich, wie in Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) nachgewiesen, positiv auf die Querkzugfestigkeit auswirkt. Andererseits könnte eine Erhöhung der Spandicke zu größeren Hohlräumen im Plattenquerschnitt führen, in deren Umgebung es im Belastungsfall zur Konzentration von Spannung und damit frühzeitigem Querkzugversagen kommt, wofür auch die in der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) für eine Erhöhung der Spangröße gefundenen Ergebnisse sprechen.

Spanform

Mit Erhöhung des Schlankheitsgrades nimmt nach allen in Kapitel 2.7.2 aufgeführten Untersuchungen anhand massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten die Querkzugfestigkeit ab (Arabi et al., 2011; Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Rackwitz, 1963). Betrachtet man die Ausführungen zum Einfluss der Spanabmessungen, gilt dieser Zusammenhang im Wesentlichen, wenn die Erhöhung des Schlankheitsgrades aus einer Erhöhung der Spanlänge resultiert und nicht auf eine Reduktion der Spandicke zurückzuführen ist.

Zum Breitenverhältnis bestehen zu wenige Untersuchungen, um hieraus Grundzusammenhänge abzuleiten. Nach den zum Einfluss der Spanabmessungen auf die Querkzugfestigkeit gemachten Ausführungen, müsste eine Erhöhung des Breitenverhältnisses über eine Erhöhung der Spanlänge und/oder Reduktion der Spanbreite die Querkzugfestigkeit negativ beeinflussen.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Querkzugfestigkeit konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden. Überträgt man die Ausführungen zum Einfluss der Spanabmessungen auf die Querkzugfestigkeit auf einen möglichen Einfluss der Platttheit von Spänen, so müsste mit Erhöhung dieser die Querkzugfestigkeit positiv beeinflusst werden. Dieser Zusammenhang müsste unabhängig davon gelten ob die Erhöhung der Platttheit aus einer Erhöhung der Spanbreite und/oder Reduktion der Spandicke resultiert.

4.2.3 Sorptionseigenschaften

Spangröße

Wie in Kapitel 2.7.3 ausführlich dargestellt, wird in den meisten bestehenden Untersuchungen anhand massenspezifisch beleimter Spanplatten mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme der Dickenquellung und, sofern untersucht, auch der Wasserabsorption festgestellt (Astari et al., 2018; Atta-Obeng et al., 2013; Charoenwong & Pisuchpen; Kasim et al., 2018; Miyamoto et al., 2002; Rahman, W. M. N. W. A. et al., 2019; Röllig et al., 2024). Mehrere Autoren begründen dies über eine mit der Spangröße zunehmende Größe von Hohlräume zwischen den Spänen bzw. eine höhere Porosität, was die Zugänglichkeit für Wasser erhöht (Atta-Obeng et al., 2013; Charoenwong & Pisuchpen; Kasim et al., 2010). Dieser Effekt zeigt sich, obwohl in den Untersuchungen die Späne unterschiedlicher Größe massenspezifisch konstant beleimt wurden, wodurch mit Erhöhung der Spangröße die oberflächenspezifische Klebstoffmenge zunimmt. Wie zuvor geschildert wurde sowohl in Publikation 1 (Kapitel 3.1) als auch Publikation 2 (Kapitel 3.2) nachgewiesen, dass mit Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge Dickenquellung und

Wasserabsorption signifikant abnehmen. Der positive Effekt einer höheren oberflächenspezifischen Klebstoffmenge wird folglich in den bestehenden Untersuchungen vom negativen, mit der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) belegten, Effekt größerer interpartikulärer Hohlräume überlagert.

Kitahara und Kasagi (1955) finden für einschichtige oberflächenspezifisch beleimte Spanplatten ebenfalls eine Zunahme der Dickenquellung und Wasserabsorption mit Erhöhung der Spangröße. Zu gleichen Ergebnissen kommen die Untersuchungen, die Publikation 2 (Kapitel 3.2) zugrunde liegen. Hier wird dieser Zusammenhang ähnlich wie durch Kitahara und Kasagi (1955) über die mit der Spangröße zunehmende Größe interpartikulärer Hohlräume begründet. Größere Hohlräume schwächen demnach die interpartikulären Verbindungen, wodurch die Dickenquellung begünstigt wird. Gleichermaßen ermöglichen größere Hohlräume bzw. eine höhere Porosität die Aufnahme größerer Wassermengen, weshalb die Wasserabsorption mit der Spangröße zunimmt. Für diesen Interpretationsansatz sprechen auch die Ergebnisse der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3). Hier wurde mit Erhöhung der Spangröße eine Zunahme des mittleren Volumens interpartikulärer Hohlräume festgestellt.

Spanabmessungen

Mit Erhöhung der Spanlänge wird in den meisten bestehenden Untersuchungen anhand massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten eine Abnahme der Dickenquellung und, sofern untersucht, auch der Wasserabsorption gefunden (Brumbaugh, 1960; Liiri, 1960; Niemz, 1982). Brumbaugh (1960) liefert eine schlüssige Begründung und macht die Abnahme daran fest, dass bei längeren Spänen pro Volumeneinheit einer Spanplatte weniger Stirnfläche der Späne vorliegt, über die die Wasseraufnahme am schnellsten erfolgt, sofern, wie von Niemz und Wenk (1989) beschrieben, die longitudinale holzanatomische Richtung der Spanlängsachse folgt. Ergänzend hierzu ist eine Studie von Niemz et al. (2012) anzuführen, nach der die Wasseraufnahme von Vollholz in Faserrichtung am höchsten ist und am schnellsten erfolgt. Demnach stehen die Wasseraufnahmekoeffizienten von beispielsweise Fichtenholz, als Maß für die Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme, in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung im Verhältnis von 1 zu 1 zu 7. Darüber hinaus könnte die Abnahme der Dickenquellung bzw. der Wasserabsorption auf die, analog zu den diskutierten Einflüssen der Spanlänge auf die mechanischen Eigenschaften, mit zunehmender Spanlänge wachsende Kontaktfläche zwischen benachbarten Spänen bzw. auf eine Zunahme wirksamer Klebeverbindungen zurückgeführt werden. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass mit Erhöhung der Spanlänge bei massenspezifisch

konstanter Beleimung die oberflächenspezifische Klebstoffmenge zunimmt. In diesem Zusammenhang wurde, analog zu den aufgeführten Untersuchungen, in Publikation 2 (Kapitel 3.2) mit Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge eine signifikante Abnahme der Dickenquellung und Wasserabsorption beobachtet.

Zum Einfluss der Spanbreite auf die Sorptionseigenschaften liegen zu wenige Studien vor, um hieraus Grundzusammenhänge abzuleiten. Folgt man den Ausführungen zum Einfluss der Spanbreite auf die zuvor diskutierten mechanischen Eigenschaften, müsste eine Erhöhung der Spanbreite die Dickenquellung bzw. Wasserabsorption reduzieren, da hierdurch die Ausbildung von Kontaktflächen zwischen benachbarten Spänen bzw. eine wirksame Klebeverbindung zwischen diesen begünstigt wird.

Mit Erhöhung der Spandicke wird in den meisten Studien eine Zunahme der Dickenquellung und, sofern untersucht, auch der Wasserabsorption festgestellt (Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977; Niemz, 1982). Brumbaugh (1960) liefert auch hier eine schlüssige Begründung und verweist in Hinblick auf die Dickenquellung auf eine verstärkte Rückverformung, die aus einer höheren Verdichtung bzw. Verformung dickerer Späne im Rahmen des Pressens der Platte resultiert. Darüber hinaus verweist er auf die mit Erhöhung der Spandicke zunehmende Größe interpartikulärer Hohlräume, wodurch die Zugänglichkeit für Wasser erhöht und damit Dickenquellung und Wasserabsorption begünstigt werden. Die zunehmende Größe von Hohlräumen wird auch in Publikation 2 (Kapitel 3.2) als mögliche Ursache für die mit der Spangröße zunehmende Dickenquellung und Wasserabsorption angeführt und durch die Ergebnisse der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) validiert.

Spanform

Eine Erhöhung des Schlankheitsgrades hat nach mehreren Untersuchungen anhand massenspezifisch konstant beleimter Spanplatten eine Abnahme der Dickenquellung und, sofern untersucht, auch der Wasserabsorption zur Folge (Brumbaugh, 1960; Liiri et al., 1977). Eine ausführliche Begründung hierzu wurde zuvor im Zusammenhang mit dem Einfluss der Spanlänge bzw. Spandicke auf die Sorptionseigenschaften gegeben. Demnach müsste eine Erhöhung des Schlankheitsgrades durch Erhöhung der Spanlänge und/oder Reduktion der Spandicke zu einer reduzierten Dickenquellung und Wasserabsorption führen.

Das Breitenverhältnis hat nach Rackwitz (1963) keinen signifikanten Einfluss auf die Sorptionseigenschaften. Folgt man den Ausführungen zum Einfluss der Spanabmessungen auf die

Sorptionseigenschaften, müsste eine Erhöhung des Breitenverhältnisses durch Erhöhung der Spanlänge eine Reduktion von Dickenquellung und Wasserabsorption zur Folge haben. Gegenteiliges ist für eine Erhöhung des Breitenverhältnisses durch Reduktion der Spanbreite anzunehmen.

Zum Einfluss der Platttheit von Spänen auf die Sorptionseigenschaften konnten nach ausführlicher Literaturrecherche keine Untersuchungen gefunden werden. Überträgt man die Ausführungen zum Einfluss der Spanabmessungen auf die Sorptionseigenschaften auf einen möglichen Einfluss der Platttheit von Spänen, so müssten mit Erhöhung dieser die Dickenquellung und Wasserabsorption abnehmen. Dieser Zusammenhang müsste unabhängig davon gelten, ob die Erhöhung der Platttheit aus einer Erhöhung der Spanbreite und/oder Reduktion der Spandicke resultiert.

4.3 Ausprägung der Porenstruktur und Verdichtung der Holzsubstanz in Abhängigkeit der Spangeometrie

Nach verschiedenen Autoren nimmt mit der Spangröße das Volumen interpartikulärer Hohlräume und die Porosität von Spanplatten zu (Atta-Obeng et al., 2013; Chaydarreh et al., 2022b). Dieser Zusammenhang wurde auch in den eigenen Untersuchungen, die der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) zugrunde liegen, anhand der Auswertung von μ CT-Scans bzw. daraus generierter binärer Datensätze dreier Plattentypen (Tabelle 9; Plattentyp 2, 3 und 4) aus Spänen unterschiedlicher Spangröße festgestellt. Für die betrachteten Plattentypen nahm die Anzahl der interpartikulären Hohlräume mit zunehmender Spangröße ab, während sowohl das mittlere Volumen der Hohlräume als auch die Porosität zunahm.

Führt man die Ergebnisse bestehender Untersuchungen mit denen der eigenen Untersuchungen zusammen, lässt sich der Einfluss der Spangeometrie auf die Porenstruktur weiter spezifizieren. So nimmt nach Ausführungen von Brumbaugh (1960) speziell mit der Erhöhung der Spandicke die Größe interpartikulärer Hohlräume in Spanplatten zu. Analog hierzu betonen Li et al. (2009) für strand-basierte Holzwerkstoffe, dass der Einfluss der Spandicke auf die Ausprägung der Porenstruktur deutlich stärker sei, als der der Strandlänge und -breite. Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen weisen Parallelen hierzu auf. Betrachtet man die in Tabelle 8 aufgeführten Ergebnisse der Spanvermessung aus Publikation 2 (Kapitel 3.2), fällt auf, dass über die Plattentypen (Tabelle 9; Plattentyp 2, 3 und 4), für die in der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) mit zunehmender Spangröße eine Zunahme des mittleren Volumens

interpartikulärer Hohlräume festgestellt wurde, die Spandicke im Vergleich zur Spanbreite und -länge am stärksten zunimmt. Mit Erhöhung der Spangröße von 1–1,5 mm auf 2–3 mm nimmt hier die Spandicke um 145 %, die Spanbreite um 109 % und die Spanlänge um 71 % zu. Es kann geschlussfolgert werden, dass die Spandicke einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Porenstruktur hat, wenn Spanplatten einheitlicher Zieldichte aus unterschiedlichen Spanmaterialien variierender Geometrie hergestellt werden. Die Herstellung von Spanplatten aus flächigen Spänen, mit im Vergleich zu ihrer Dicke großer Länge und Breite, müsste demnach zu Platten mit geringem mittlerem Volumen interpartikulärer Hohlräume und geringer Porosität führen.

Ein Nebenaspekt, der ebenfalls in den Untersuchungen der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) thematisiert wird und an dieser Stelle Erwähnung finden sollte, ist die Verdichtung der Holzsubstanz. Interessanterweise nimmt in der Untersuchung die Porosität mit Erhöhung der Spangröße bei einheitlicher Zieldichte der unterschiedlichen Plattentypen zu. Umgekehrt formuliert nimmt der volumenbezogene Materialanteil über die Plattentypen mit Erhöhung der Spangröße ab. Bei anzunehmender einheitlicher Holzrohndichte der für die Plattenherstellung herangezogenen Spanfraktionen ist dieser Zusammenhang nur durch eine stärkere Verdichtung der Holzsubstanz zu erklären die sich auch in den hierzu berechneten Werten widerspiegelt. Die mittlere Dichte der Holzsubstanz beläuft sich für Platten aus Spänen der Spangröße 1–1,5 mm auf 611 kg/m^3 , für 1,5–2 mm auf 645 kg/m^3 und für 2–3 mm auf 712 kg/m^3 . Dieser Effekt ist vor dem Hintergrund, dass sich der Pressdruck bei höherer Porosität auf eine geringere Gesamtkontaktfläche zwischen den Spänen verteilt, plausibel. Die Verdichtung über den Wert der nativen Rohdichte des eingesetzten Holzes (vermutlich Fichte und Kiefer) ist vornehmlich auf eine Kompression der Zelllumina bzw. Gefäße zurückzuführen, die sich beim Pressen der Spanmatte zur fertigen Platte einstellt. Eine Verdichtung der Zellwandsubstanz ist bei in der Spanplattenherstellung gängigen Pressdrücken unwahrscheinlich. Nach Liiri et al. (1977) beeinflusst eine höhere Verdichtung die mechanischen Platteneigenschaften positiv. Sie stellen diesen Zusammenhang anhand der Herstellung und Untersuchung von Spanplatten einheitlicher Zieldichte aus Holzarten variierender Rohdichte fest. In den eigenen Untersuchungen konnte ein positiver Effekt der mit zunehmender Spangröße bzw. zunehmender Porosität stärker verdichteten Holzsubstanz nicht festgestellt werden. Hier scheint der sich mit Erhöhung der Spangröße einstellende negative Effekt größerer Hohlräume bzw. der höheren Porosität den positiven Effekt einer stärkeren Verdichtung der Holzsubstanz zu überwiegen. Es ist anzunehmen, dass die von Liiri et al. (1977) und anderen Autoren mit stärkerer Verdichtung festgestellte Zunahme der mechanischen Platteneigenschaften insbesondere gilt, wenn bei den Untersuchungen für

unterschiedliche Plattentypen Späne unterschiedlicher Holzrohddichte aber einheitlicher Geometrie eingesetzt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die Ausprägung der Porenstruktur als auch die Verdichtung der Holzsubstanz von der Spangeometrie des für die Plattenherstellung eingesetzten Spanmaterials abhängen. Wie sich diese Zusammenhänge auf die makroskopischen Eigenschaften von Spanplatten auswirken wird im folgenden Kapitel (4.4) diskutiert.

4.4 Poren- und Spanstruktur im Kontext makroskopischer Eigenschaften von Spanplatten

Viele der in Kapitel 2.7 aufgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Spangeometrie auf die Platteneigenschaften, liefern interessante Interpretationsansätze zur Erklärung der gefundenen Zusammenhänge. Von mehreren Autoren wird auf die unter anderem von der Spangeometrie abhängige Packungsdichte der Späne und die daraus resultierende Hohlraum- bzw. Porenstruktur verwiesen, die sich sowohl auf die mechanischen als auch die physikalischen Platteneigenschaften auswirken. Der Begriff der Packungsdichte beschreibt dabei allgemein wie dicht die Späne räumlich innerhalb der Spanplatte angeordnet sind. Moslemi (1974) spricht in diesem Zusammenhang flächigen Späne mit im Vergleich zu ihrer Dicke großer Länge und Breite eine gute Stapelbarkeit zu, was im Umkehrschluss eine höhere Packungsdichte beziehungsweise kleinere interpartikuläre Hohlräume und eine geringere Porosität impliziert.

Nach den Interpretationsansätzen verschiedener Studien beeinflusst eine Zunahme der Größe von Hohlräumen bzw. eine Zunahme der Porosität die mechanischen Platteneigenschaften negativ, während Sorptionseigenschaften wie die Dickenquellung und Wasserabsorption in diesem Zuge zunehmen. So beobachten beispielsweise Kitahara und Kasagi (1955) bei Erhöhung der Spangröße einschichtiger, oberflächenspezifisch konstant beleimter Spanplatten eine Abnahme der Biegefestigkeit sowie des Biege-E-Moduls und begründen diese über eine mit zunehmender Spangröße abnehmende Packungsdichte und zunehmende Porosität. Demnach werden Spannungen, die im Falle einer Biegebelastung auftreten weniger gleichmäßig über das Spangefüge verteilt, wodurch es zu einer verstärkten Konzentration der Spannungen kommt, die ein frühzeitiges Biegeversagen begünstigen. Ein analoger Interpretationsansatz wird in Publikation 2 (Kapitel 3.2) für die bei Erhöhung der Spangröße festgestellte Abnahme der Biegefestigkeit und des Biege-E-Moduls angeführt. Auch für die Querzugfestigkeit wird in mehreren Studien an einschichtigen, massenspezifisch konstant beleimten Spanplatten mit Erhöhung der Spangröße

eine Abnahme festgestellt und beispielsweise von Kasim et al. (2018), analog zum Interpretationsansatz von Kitahara und Kasagi (1955), über die höhere Packungsdichte von Spanplatten aus feineren Spänen bzw. im Umkehrschluss geringere Packungsdichte und höhere Porosität von Spanplatten aus gröberen Spänen begründet. Nach den Autoren liegt bei Spanplatten aus gröberen Spänen eine geringere Anzahl an Kontaktstellen zwischen den Spänen vor, wodurch Spannungen ungleichmäßiger über das Spangefüge verteilt werden und es zu einer verstärkten Konzentration von Spannungen kommt, die ein frühzeitiges Quersugversagen begünstigen. In Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) wird die Abnahme der Quersugfestigkeit mit Erhöhung der Spangröße auch für oberflächenspezifisch konstant beleimte Spanplatten festgestellt und in Publikation 2 (Kapitel 3.2) auf vergleichbare Weise begründet. Auch eine mit der Spangröße zunehmende Dickenquellung und Wasserabsorption, wird, wie in Publikation 2 (Kapitel 3.2) von mehreren Autoren über die mit der Spangröße zunehmende Größe von Hohlräumen und damit höhere Porosität begründet (Atta-Obeng et al., 2013; Charoenwong & Pisuchpen; Kasim et al., 2010; Kitahara & Kasagi, 1955).

In keiner der aufgeführten Studien wird die aus der Spangeometrie resultierende Porenstruktur und deren Auswirkung auf die makroskopischen Platteneigenschaften tiefergehend erforscht. Vor diesem Hintergrund hatte die dritte zur Publikation vorgesehene Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) zum Ziel, den Zusammenhang zwischen Spangröße, Porenstruktur und makroskopischen Platteneigenschaften anhand der in Publikation 2 (Kapitel 3.2) zur Untersuchung des Einflusses der Spangröße herangezogenen Plattentypen (Tabelle 9; Plattentyp 2, 3 und 4) genauer zu betrachten.

Wie in Kapitel 4.3 geschildert, wurde anhand der Analyse von μ CT-Scans bzw. daraus generierter binärer Datensätze der aufgeführten Plattentypen mit zunehmender Spangröße eine Zunahme des mittleren Volumens interpartikulärer Hohlräume sowie eine Zunahme der Porosität festgestellt. Hiermit lässt sich der von verschiedenen Autoren und in Publikation 2 (Kapitel 3.2) angeführte Interpretationsansatz zur Erklärung der mit der Spangröße zunehmenden Dickenquellung und Wasserabsorption validieren. Einerseits schwächen größere Hohlräume die Verbindung der Späne untereinander, andererseits erhöhen diese die Zugänglichkeit für Wasser und begünstigen eine verstärkte Dickenquellung. Andererseits ermöglicht ein höheres Gesamtvolumen interpartikulärer Hohlräume bzw. eine höhere Porosität die Aufnahme größerer Wassermenge, was sich in höheren Werten der Wasserabsorption widerspiegelt.

Für eine tiefergehende Untersuchung des Einflusses der Porenstruktur bzw. des Spangefüges auf die mechanischen Platteneigenschaften wurden die binären Datensätze in ein FEM-Modell überführt und verschiedene Belastungsfälle simuliert. Hierbei zeigten sich direkte Parallelen zu den Ergebnissen der Laborversuche zum Einfluss der Spangröße auf die mechanischen Eigenschaften aus Publikation 1 (Kapitel 3.1) und Publikation 2 (Kapitel 3.2) bzw. denen der zu Beginn dieses Kapitels aufgeführten Studien. Die FEM-Simulationen zeigten, dass sich die Spannungen im jeweiligen Belastungsfall bevorzugt in den Bereichen des Materials konzentrieren, die große interpartikuläre Hohlräume umgeben. Bei Simulation einer einheitlichen Belastung der modellierten Plattentypen zeigte sich mit Erhöhung der Spangröße eine größere Anzahl von Spannungsspitzen. Letztlich wird das Bruchversagen, unabhängig vom betrachteten Belastungsfall, lokal initiiert sobald im Falle einer Spannungsspitze die Holzfestigkeit oder aber die Festigkeit des ausgehärteten Klebstoffs in der Leimfuge zwischen benachbarten Spänen überschritten wird. Ausgehend von diesem lokalen Versagen setzt sich die plastische Verformung fort. Für alle Belastungsfälle zeigte sich entsprechend für die simulierten E-Module eine Abnahme mit Erhöhung der Spangröße über die modellierten Plattentypen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der in Publikation 2 (Kapitel 3.2) festgestellten Abnahme der Biegeeigenschaften und der in Publikation 1 (Kapitel 3.1) und 2 (Kapitel 3.2) festgestellten Abnahme der Querkzugfestigkeit mit Erhöhung der Spangröße. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zusammenhänge zwischen Spangröße und mechanischen Platteneigenschaften aus den mechanischen Laborversuchen mit den Ergebnissen der dritten zur Publikation vorgesehenen Forschungsarbeit (Kapitel 3.3) erklärt bzw. validiert werden können.

Die Ergebnisse der FEM-Simulationen lassen eine Aussage zum Einfluss der in Abhängigkeit der Spangröße entstehenden Porenstruktur bzw. des Spangefüges auf die Platteneigenschaften zu. Letztlich lässt sich hieran der schwächende Effekt großer Hohlräume im Spangefüge verdeutlichen, der sich auf die meisten mechanischen Platteneigenschaften negativ auswirkt. So stellen beispielsweise Wu et al. (2004) analog hierzu bei FEM-Simulationen zur Belastung von OSB-Platten die schwächende Wirkung von Hohlräumen fest, die sich auch hier in einer Reduktion der simulierten E-Module zeigt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Spangröße über die Ausbildung der Porenstruktur und des Spangefüges einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Platteneigenschaften ausübt und damit als zentrale strukturprägende Einflussgröße zu bewerten ist.

5 Fazit und Ausblick

Das übergeordnete Ziel dieser kumulativen Dissertation bestand darin, den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten genauer zu untersuchen. Hierzu wurde der Stand des Wissens systematisch aufgearbeitet, übergreifend diskutiert und durch die Ergebnisse eigener Forschungsarbeiten gezielt erweitert. Der Fokus lag dabei auf der Betrachtung des isolierten Einflusses der Spangröße sowie auf der Analyse der zugrunde liegenden strukturellen Ursachen der beobachteten Materialeigenschaften.

Vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit wird deutlich, dass der Einfluss der Spangröße, einzelner Spanabmessungen oder der Spanform auf die Eigenschaften von Spanplatten in vielen bisherigen Untersuchungen durch methodisch bedingte Störfaktoren überlagert ist. In den eigenen Untersuchungen konnten diese Störfaktoren durch einen einschichtigen Plattenaufbau mit homogenem Rohdichteprofil und einheitlicher oberflächenspezifischer Klebstoffmenge für Plattentypen aus Spanmaterialien unterschiedlicher Spangröße ausgeschlossen werden. Auf dieser Grundlage lassen sich übergreifende Grundzusammenhänge ableiten. Mit zunehmender Spangröße verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Spanplatten, während gleichzeitig die Wasseraufnahme und die Dickenquellung zunehmen. Grundzusammenhänge wie diese stellen die Grundlage für eine zielgerichtete Optimierung der Platteneigenschaften dar.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die oberflächenspezifische Klebstoffmenge einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung der Platteneigenschaften hat und den Einfluss der Spangeometrie überlagern kann. Eine Erhöhung der oberflächenspezifischen Klebstoffmenge wirkt sich grundsätzlich positiv auf die mechanischen Eigenschaften aus und führt zugleich zu einer verbesserten Feuchtebeständigkeit von Spanplatten. Die Ergebnisse unterstreichen, dass belastbare Aussagen zum Einfluss der Spangeometrie nur dann getroffen werden können, wenn der Einfluss der Klebstoffmenge durch den gewählten Versuchsansatz gezielt kontrolliert wird.

Im Unterschied zu vielen bestehenden Arbeiten beschränkt sich die vorliegende Dissertation nicht auf die Beschreibung makroskopischer Eigenschaften, sondern untersucht vertiefend die strukturellen Ursachen der beobachteten Effekte. Die Auswertung tomographischer Datensätze zeigte, dass mit zunehmender Spangröße sowohl das mittlere Volumen interpartikulärer Hohlräume als auch die Porosität ansteigen. Die auf Basis dieser Strukturdaten durchgeführte FEM-Simulationen belegen, dass mit einer Erhöhung der Spangrößen eine stärkere Konzentration von

Spannungen und erhöhte Spannungsspitzen einhergehen, was sich konsistent in einer Abnahme der simulierten Elastizitätsmodulen widerspiegelt. Damit liefern die Ergebnisse einen struktur-basierten Erklärungsansatz für den Einfluss der Spangröße auf die mechanischen Eigenschaften von Spanplatten und erlauben eine Validierung bestehender Interpretationsansätze, die sich auf die Packungsdichte, Kontaktstellen und wirksame Leimverbindungen zwischen den Spänen beziehen. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die FEM-Simulationen nicht auf die Vorhersage exakter Materialkennwerte abzielten, sondern dem Vergleich des strukturabhängigen Materialverhaltens unterschiedlicher Plattentypen dienten. Für eine exakte Eigenschaftsvorhersage wäre die Berücksichtigung weiterer Parameter erforderlich, wie beispielsweise der Spanorientierung innerhalb der Platte, der Faserorientierung in den Spänen sowie der holzanatomisch richtungsabhängigen Holzfestigkeiten.

Zusammenfassend tragen die Ergebnisse dieser Dissertation zu einem vertieften Verständnis der Zusammenhänge zwischen Spangeometrie, resultierender Materialstruktur und makroskopischen Eigenschaften von Spanplatten bei. Die Arbeit verdeutlicht, dass eine gezielte Variation der Spangeometrie über ihre Wirkung auf die Ausprägung der Poren- bzw. Materialstruktur einen zentralen Ansatz zur Optimierung der Platteneigenschaften darstellt.

Darüber hinaus liefert die vorliegende Dissertation eine fundierte Basis für weiterführende Forschungsansätze. Der gewählte Versuchsansatz zur Herstellung von Laborspanplatten kann als Blaupause für zukünftige Untersuchungen zum Einfluss einzelner Spanabmessungen dienen. Auf dieser Grundlage lassen sich weitere Grundzusammenhänge ableiten und der Forschungsstand gezielt erweitern. Darüber hinaus stellt die Kombination CT-basierter Geometrien mit FEM-Simulationen eine zukunftsweisende Methode zur tiefergehenden Analyse des Materialverhaltens und Vorhersage von Platteneigenschaften dar.

6 Literaturverzeichnis

- Ahmad, Z., Tajuddin, M., Maleque, M. A. & Halim, Z. (2019). Effects of Particle Sizes on the Properties of Binderless Boards Made from Rattan Furniture Waste. *Journal of Engineering Science*, 15, 49–61. <https://doi.org/10.21315/jes2019.15.5>
- Akinyemi, B. A., Okonkwo, C. E., Alhassan, E. A. & Ajiboye, M. (2019). Durability and strength properties of particle boards from polystyrene–wood wastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(6), 1541–1549. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00905-6>
- Amiandamhen, S. O. & Izekor, D. N. (2013). Effect of wood particle geometry and pre-treatments on the strength and sorption properties of cement-bonded particle boards. *Journal of Applied and Natural Science*, 5(2), 318–322. <https://doi.org/10.31018/jans.v5i2.324>
- Angelidakis, V., Nadimi, S. & Utili, S. (2022). Elongation, flatness and compactness indices to characterise particle form. *Powder Technology*, 396, 689–695. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.027>
- Arabi, M., Faezipour, M. & Gholizadeh, H. (2011). Reducing resin content and board density without adversely affecting the mechanical properties of particleboard through controlling particle size. *Journal of Forestry Research*, 22(4), 659–664. <https://doi.org/10.1007/s11676-011-0207-3>
- Astari, L., Prasetyo, K. W. & Suryanegara, L. (2018). Properties of Particleboard Made from Wood Waste with Various Size. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 166, 12004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/166/1/012004>
- Atta-Obeng, E., Via, B. K. & Fasina, O. (2013). Effect of microcrystalline cellulose, species, and particle size on mechanical and physical properties of particleboard. *Wood and Fiber Science*, 44(2), 1–9. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1760>
- Badejo, S. O. O. (1988). Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, 22(4), 357–369. <https://doi.org/10.1007/BF00353325>
- Bazzetto, J. T. L., Junior, G. B. & Brito, F. M. S. (2019). Effect of Particle Size on Bamboo Particle Board Properties. *Floresta e Ambiente*, 26(2), Artikel e20170125. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.012517>
- Benthien, J. T. (2022). *Holzreduzierte Spanplatte* [Dissertation]. Universität Hamburg. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/9888>

- Benthien, J. T., Engehausen, N. & Lüdtkke, J. (2022a). 3D-Spanvermessung mit Laser-Profilensensoren: Betrachtung von Technologie, Potenzial im Prozess und Leistungsdaten hinsichtlich der Messkopfauswahl. *Holz-Zentralblatt*(32), 541–543.
- Benthien, J. T., Heldner, S. & Lüdtkke, J. (2019a). Vorteile durch bildanalytisches Messen der Spandicken. *Holz-Zentralblatt*(50), 1101–1103.
- Benthien, J. T., Lüdtkke, J. & Ohlmeyer, M. (2019b). Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(6), 1029–1043. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01452-5>
- Benthien, J. T. & 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. *Fibers*, 8(7), 46. <https://doi.org/10.3390/fib8070046>
- Benthien, J. T., 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. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(3), 937–945. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1270-z>
- Benthien, J. T., Sieburg-Rockel, J., Engehausen, N., Koch, G. & Lüdtkke, J. (2022b). Analysis of Adhesive Distribution over Particles According to Their Size and Potential Savings from Particle Surface Determination. *Fibers*, 10(11), 97. <https://doi.org/10.3390/fib10110097>
- Blanchet, P., Cloutier, A. & Riedl, B. (2008). Bark particleboard: pressing time, particle geometry and melamine overlay. *The forestry chronicle*, 84(2), 244–250. <https://doi.org/10.5558/tfc84244-2>
- Brumbaugh, J. (1960). Effect of flake dimensions on properties of particle board. *Forest Products Journal*(5), Artikel 10.
- Charoenwong, C. & Pisuchpen, S. Effect of adhesives and particle sizes on properties of composite materials from sawdust. In *Proceedings of the 7th IMT-GT UNINET and the 3rd International PSU-UNS Conferences on Bioscience* (S. 108–121).
- Chaydarreh, K. C., Lin, X., Dandan, L., Zhang, W., Guan, L. & Hu, C. (2022a). Developing 3-layer tea oil camellia (*Camellia oleifera* Abel.) shells-based particleboard with systematic study on particle geometry and distribution. *Industrial Crops and Products*, 179, 114682. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114682>
- Chaydarreh, K. C., Lin, X., Guan, L. & Hu, C. (2022b). Interaction between particle size and mixing ratio on porosity and properties of tea oil camellia (*Camellia oleifera* Abel.) shells-based

- particleboard. *Journal of Wood Science*, 68(1). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02052-3>
- Cheng, X., He, X., Xie, J., Quan, P., Xu, K., Li, X. & Cai, Z. (2016). Effect of the particle geometry and adhesive mass percentage on the physical and mechanical properties of particleboard made from peanut hull. *BioResources*, 11(3), 7271–7281. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7271-7281>
- Cosereanu, C., Brenci, L.-M., Zeleniuc, O. & Fotin, A. (2015). Effect of particle size and geometry on the performance of single-layer and three-layer particleboard made from sunflower seed husks. *BioResources*, 10(1), 1127–1136. <https://doi.org/10.15376/biores.10.1.1127-1136>
- Deppe, H. J. & Ernst, K. (2000). *Taschenbuch der Spanplattentechnik* (4. überarbeitete und erweiterte Auflage). DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.
- Dunky, M. (1988). Einfluss der Spangrößenverteilung auf den Beileimungsgrad der Späne. *Holz-forschung und Holzverwertung*, 40(6), 126–133.
- Dunky, M. & Niemz, P. (2002). *Holzwerkstoffe und Leime*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-55938-9>
- Engehausen, N., Benthien, J. T. & Lüdtke, J. (2024). Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards. *Fibers*, 12(4), 32. <https://doi.org/10.3390/fib12040032>
- Engehausen, N., Benthien, J. T. & Lüdtke, J. (2025). Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(3), 123. <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02275-3>
- Fehrmann, J., Belleville, B. & Ozarska, B. (2022). Effects of Particle Dimension and Constituent Proportions on Internal Bond Strength of Ultra-Low-Density Hemp Hurd Particleboard. *Forests*, 13(11), 1967. <https://doi.org/10.3390/f13111967>
- Ferrandez-Garcia, M. T., Ferrandez-Garcia, A., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, C. E. & Ferrandez-Villena, M. (2020). Influence of Particle Size on the Properties of Boards Made from Washingtonia Palm Rachis with Citric Acid. *Sustainability*, 12(12), 4841. <https://doi.org/10.3390/su12124841>
- Ferrández-García, C. E., Ferrández-García, A., Ferrández-Villena, M., Hidalgo-Cordero, J. F., García-Ortuño, T. & Ferrández-García, M.-T. (2018). Physical and Mechanical Properties of Particleboard Made from Palm Tree Prunings. *Forests*, 9(12), 755. <https://doi.org/10.3390/f9120755>

- Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia-Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A. & Ferrandez-Garcia, M. T. (2020). The Influence of Processing and Particle Size on Binderless Particleboards Made from *Arundo donax* L. Rhizome. *Polymers*, 12(3).
<https://doi.org/10.3390/polym12030696>
- Gupta, G., Yan, N. & Feng, M. W. (2011). Effects of pressing temperature and particle size on bark board properties made from beetle-infested lodgepole pine (*Pinus contorta*) barks. *Forest Products Journal*, 61(6), 478–488.
- Haselein, C. R., Calegari, L., Barros, M. V., Hack, C., Hillig, É., Pauleski, D. T. & Pozzera, F. (2010). Mechanical strength and dimensional stability of particleboard made with different particle sizes. *Ciência Florestal*, 12(2), 127–134. <https://doi.org/10.5902/198050981687>
- Hashim, R., Saari, N., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Hizioglu, S., Sato, M. & Tanaka, R. (2010). Effect of particle geometry on the properties of binderless particleboard manufactured from oil palm trunk. *Materials & Design*, 31(9), 4251–4257.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.012>
- Hegazy, S. S. & Ahmed, K. (2015). Effect of Date Palm Cultivar, Particle Size, Panel Density and Hot Water Extraction on Particleboards Manufactured from Date Palm Fronds. *Agriculture*, 5(2), 267–285. <https://doi.org/10.3390/agriculture5020267>
- Istek, A., Aydin, U. & Özlüsoylu, I. The effect of chip size on the particleboard properties. In *Proceedings of the international congress (ICELIS)* (S. 439–444).
- Iswanto, A. H. (2018). Oriented particleboard made from tali bamboo (*Gigantochloa Apus*): effect of particle length on physical and mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309, Artikel 012038, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012038>
- Iswanto, A. H. & Ompusunggu, P. L. (2019). Sandwich Particleboard (SPb): effect of particle length on the quality of board. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 374(1), Artikel 012002, 1–4. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/374/1/012002>
- Iswanto, A. H., Prabuningrum, D. S., Azhar, I. & Supriyanto, S. (2018). Effect of Particle Length to the Quality Particleboard Made from Sorghum Bagasse. *Journal of Sylva Indonesiana*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.32734/jsi.v1i1.423>
- Jensen, U. (1966). *Untersuchungen zur Siebfraktionierung von Spangemischen durch Bestimmung der Spanabmessungen, der Streudichte und der Spangrößenverteilung mit Angabe des notwendigen Stichprobenumfangs* [Ingenieurarbeit]. Technische Universität, Dresden.

- Juliana, A. H., Paridah, M. T., Rahim, S., Nor Azowa, I. & Anwar, U. (2012). Properties of particleboard made from kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) as function of particle geometry. *Materials & Design*, *34*, 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.019>
- Kasim, J., Ahmad, A. J., Harun, J., Mohmod, A. L. & Yusoff, N. M. (2000). Interior grade particleboard from bamboo (*Gigantochloa scortechinii*): influence of age, particle size, resin and wax content on board properties. *Journal of Tropical Forest Products*, *6*(2), 142–151.
- Kasim, J., Mahmud, S. Z., Ahmad, N., Yamani, S. A. K., Tamiran, S. N. A., Shahrman, N. S. & Razak, N. A. (2010). Effects of particle sizes, resin content and board densities on the properties of phenol formaldehyde particleboard from oil palm trunk particles. *Scientific Research Journal*, *7*(1), 1–12. <https://doi.org/10.24191/srj.v7i1.5007>
- Kasim, J., Yusof, A. A. M., Hashim, N. H. M. & Salamat, N. A. (2018). Effects of particle sizes, resin content and board densities on the properties of sesendok particleboard. *Jurnal Gading UiTM Pahang*, *12*(1), 1–9.
- Kimoto, K., Ishimori, E., Sasaki, H. & Maku, T. *Studies on the Particle Boards: Report 6: Effects of Resin Content and Particle Dimension on the Physical and Mechanical Properties of Low-Density Particle Boards* (Wood Research: Reports of the Wood Research Institute, Kyoto University).
- Kitahara, K. & Kasagi, K. (1955). Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chipboard. *Wood Industry*, *10*(8), 406–412.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: 1. Band*. Springer.
- Leng, W., Hunt, J. F. & Tajvidi, M. (2017). Effects of density, cellulose nanofibrils addition ratio, pressing method, and particle size on the bending properties of wet-formed particleboard. *BioResources*, *12*(3), 4986–5000. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.4986-5000>
- Li, Dai, C. & Wang, S. (2009). A simulation of void variation in wood-strand composites during consolidation. *Holzforschung*, *63*(3), 357–361. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.044>
- Li, X., Cai, Z., Winandy, J. E. & Basta, A. H. (2010). Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries. *Bioresource technology*, *101*(12), 4662–4666. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.053>
- Lias, H., Kasim, J., Johari, N. A. N. & Mokhtar, I. L. M. (2014). Influence of board density and particle sizes on the homogenous particleboard properties from kelempayan (*Neolamarckia cadamba*). *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, *3*(6), 173–176.

- Liiri, O. (1960). Investigations on particle preparation and the significance of particle properties in the manufacture of particle board. *Paperi ja Puu*, 42(2), 57–62.
- Liiri, O., Kivisto, A. & Saarinen, A. (1977). Der Einfluß von Holzart, Spangröße und Bindemittel auf die Festigkeit und die Quellung von Spanplatten mit höheren elastomechanischen Eigenschaften. *Holzforschung und Holzverwertung*(6), 117–121.
- Lui, F. H. Y., Kurokochi, Y., Narita, H., Saito, Y. & Sato, M. (2018). The effects of chemical components and particle size on the mechanical properties of binderless boards made from oak (*Quercus* spp.) logs degraded by shiitake fungi (*Lentinula edodes*). *Journal of Wood Science*, 64(3), 246–255. <https://doi.org/10.1007/s10086-018-1695-y>
- Marashdeh, M. W., Hashim, R., Tajuddin, A. A., Bauk, S. & Sulaiman, O. (2011). Effect of particle size on the characterization of binderless particleboard made from rhizophora spp. mangrove wood for use as phantom material. *BioResources*, 6(4), 4028–4044. <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.4028-4044>
- May, H.-A. (1973). *Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Beleimung von Spänen in industriellen Beleimungsmaschinen bei der Holzspanplattenherstellung* (WKI-Bericht Nr. 2). Wilhelm-Klauditz-Institut.
- May, H.-A. (1982). Zusammenhänge zwischen Eigenschaften, Rohstoffkomponenten und dem Dichteprofil von Spanplatten (Teil 2). *European Journal of Wood and Wood Products*, 40, 303–306. <https://doi.org/10.1007/BF02610625>
- Medved, S. & Resnik, J. (2003). Influence of beech particle size used in surface layer on bending strength of three-layer particleboard. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 72, 197–207.
- Miyamoto, K., Nakahara, S. & Suzuki, S. (2002). Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. *Journal of Wood Science*, 48(3), 185–190. <https://doi.org/10.1007/BF00771365>
- Moslemi, A. A. (1974). *Particleboard*. Southern Illinois University Press.
- Nasser, R. A., Al-Mefarrej, H. A., Abdel-Aal, M. A. & Alshahrani, T. S. (2014). Effects of tree species and wood particle size on the properties of cement-bonded particleboard manufacturing from tree prunings. *Journal of Environmental Biology*, 35(5), 961–971.
- Nazerian, M. & Eghbal, S. H. (2013). The influence of additive content and particle size of bagasse on some properties of cement-bonded particleboard. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 10(2), 86–94. <https://doi.org/10.1007/s13196-013-0099-2>
- Nazerian, M., Ghalehno, M. D. & Gozali, E. (2011). Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood–cement composites on physical

- and mechanical properties of cement-bonded particleboard. *Wood Material Science & Engineering*, 6(4), 196–206. <https://doi.org/10.1080/17480272.2011.601816>
- Nguyen, T. T., Bailleres, H., Redman, A., Leggate, W., Vandi, L.-J. & Heitzmann, M. (2020). Homogenous particleboard made from whole cotton (*Gossypium hirsutum* L.) stalk agricultural waste: Optimisation of particle size and influence of cotton residue on performance. *BioResources*, 15(4), 7730–7748. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.7730-7748>
- Niemz, P. (1982). Untersuchungen zum Einfluß der Struktur auf die Eigenschaften von Spanplatten (Teil 1). *Holztechnologie*, 23(4), 206–213.
- Niemz, P. (1983). Untersuchungen zum Einfluß der Struktur auf die Eigenschaften von Spanplatten (Teil 2). *Holztechnologie*, 24(1), 14–18.
- Niemz, P. & Sandberg, D. (2022). Critical wood-particle properties in the production of particleboard. *Wood Material Science & Engineering*, 17(5), 386–387. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2054726>
- Niemz, P. & Schweitzer, F. (1990). Einfluß ausgewählter Strukturparameter auf die Zug- und Druckfestigkeit von Spanplatten. *European Journal of Wood and Wood Products*, 48(10), 361–364. <https://doi.org/10.1007/BF02634518>
- Niemz, P., Sonderegger, W., Häring, D., Joščák, M. & Krackler, V. (2012). Untersuchungen zur Wasseraufnahme von Vollholz und Holzwerkstoffen. *Bauphysik*, 34(3), 101–106. <https://doi.org/10.1002/bapi.201200014>
- Niemz, P. & Wenk, S. (1989). Kenngrößen zur Beurteilung von Spangemischen und deren Meßbarkeit. *Holztechnologie*, 30(3), 117–122.
- Osarenmwinda, J. O. & Nwachukwu, J. C. (2007). Effect of Particle Size on Some Properties of Rice Husk Particleboard. *Advanced Materials Research*, 18-19, 43–48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.18-19.43>
- Plath, E. (1963). Einfluß der Rohdichte auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen. *European Journal of Wood and Wood Products*, 21(3), 104–108. <https://doi.org/10.1007/BF02609708>
- Post, P. W. (1958). Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake board. *Forest Products Journal*, 8(10), 317–322.
- Rackwitz, G. (1963). Der Einfluß der Spanabmessungen auf einige Eigenschaften von Holzspanplatten. *European Journal of Wood and Wood Products*, 21(6), 200–209. <https://doi.org/10.1007/BF02609724>

- Rahman, W. M. N. W. A., Yatim, A. A. M., Zlan, A. A. M., Kasim, J. & Yunus, N. Y. M. (2019). Effects of the resin content and particle size on the properties of particleboard made of neolamarckia and leucaena particles. *BioResources*, 14(3), 6079–6087.
<https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6079-6087>
- Röllig, P., Tudor, E. M., Barbu, M. C. & Direske, M. (2024). Effect of the particle geometry on lightweight particleboard from Paulownia using high-frequency pressing technology. *Wood Material Science & Engineering*, 19(3), 683–690.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2286625>
- Saari, N., Sulaiman, O., Sugimoto, T., Sato, M., Tanaka, R. & Hashim, R. (2012). Study on binderless particleboard: the effect of particle geometry using oil palm trunk as raw material. *JIRCAS Working Report*(73), 52–55.
- Sackey, E. K., Semple, K. E., Oh, S. W. & Smith, G. D. (2008). Improving core bond strength of particleboard through particle size redistribution. *Wood and Fiber Science*(2), 214–224.
<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/752>
- Schneider, A., Roffael, E. & May, H.-A. (1982). Untersuchungen über den Einfluß von Rohdichte, Bindemittelaufwand und Spänebeschaffenheit auf das Sorptionsverhalten und die Dickenquellung von Holzspanplatten. *European Journal of Wood and Wood Products*, 40(9), 339–344. <https://doi.org/10.1007/BF02627677>
- Sudin, R., Shaari, K. & Selamat, S. (1995). Cement-bonded particleboard from pre-soaked oil palm trunk: effects of particle size and chemical additive. *Journal of Tropical Forest Products*, 1(1), 71–77.
- Sutiawan, J., Hermawan, D., Hadi, Y. S., Nawawi, D. S., Kusumah, S. S., Ningrum, R. S., Amanda, P., Ismayati, M. & Abdillah, I. B. (2024). Properties of sorghum (*Sorghum bicolor*) biomass particleboard at different maleic acid content and particle size as potential materials for table tennis blade. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(2), 1607–1619. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02525-x>
- Thoemen, H., Irle, M. & Sernek, M. (2010). *Wood-based panels: an introduction for specialists*. Brunel University Press.
- Turner, H. D. (1954). Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin-bonded wood-particle panels. *Forest Products Journal*, 4, 210–223.
- Walter, K., Kieser, J. & Wittke, T. (1979). Einfluß der Spanform auf einige Festigkeitseigenschaften orientiert gestreuter Spanplatten. *European Journal of Wood and Wood Products*, 37(5), 183–188. <https://doi.org/10.1007/BF02626531>

- Wang, D. & Sun, X. S. (2002). Low density particleboard from wheat straw and corn pith. *Industrial Crops and Products*, 15(1), 43–50. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00094-2)
- Wong, E.-D., Zhang, M., Wang, Q. & Kawai, S. (1999). Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Science and Technology*, 33(4), 327–340. <https://doi.org/10.1007/s002260050119>
- Wu, Q., Lee, J. N. & Han, G. (2004). The Influence of Voids on the Engineering Constants of Oriented Strandboard: A Finite Element Model. *Wood and Fiber Science*, 71–83. <http://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/284>
- Yemele, M. C. N., Blanchet, P., Cloutier, A. & Koubaa, A. (2008). Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black spruce and trembling aspen bark. *Forest Products Journal*, 58(11), 48–56.
- Yunus, N. Y. M., Kasim, J., Yusof, N. & Rahman, W. M. N. W. A. Effects of Particle Sizes and Board Densities on OPF Phenol Formaldehyde Particleboard Properties. In *Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences* (S. 777–786).
- Zvirgzds, K., Kirilovs, E., Kukle, S. & Gross, U. (2022). Production of Particleboard Using Various Particle Size Hemp Shives as Filler. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15030886>

Normenverzeichnis

DIN EN 310:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit

DIN EN 317:1992-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung

DIN EN 319:1993-08, Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene

DIN EN 323:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung der Rohdichte

DIN 66165-1: 2022-06, Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 1: Grundlagen

DIN 66165-2:2016-08, Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 2: Durchführung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Messverfahren zur Charakterisierung der Spangeometrie mit Gerätebeispielen. Übernommen aus Benthien et al. (2022a, S. 541).....	11
Abbildung 2 Ausprägung des oberflächenspezifischen Klebstoffauftrags bei massenspezifisch konstanter Beleimung (8 %) industrieller Mittelschichtspäne (MS) bzw. daraus gewonnener Siebfraktionen unterschiedlicher Spangröße	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht von Mittelwertbereichen der Spanabmessungen industrieller Deck- und Mittelschichtspänen in Anlehnung an eine tabellarische Übersicht von Niemz und Wenk (1989). Angaben zur Spanbreite von Deckschichtspänen wurden nach Benthien et al. (2022a) ergänzt. 8	
Tabelle 2 Gegenüberstellung der Zug- bzw. Druckfestigkeiten (bei 12 % Holzfeuchte) parallel () und quer zur Faser (⊥) von Fichte (<i>Picea abies</i>) und Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>). In Anlehnung an eine Übersicht von Kollmann (1951) (Anhang Tafel 5 (1. Teil) „Eigenschaften der wichtigsten Nutzhölzer“)	10
Tabelle 3 Auflistung von üblichen Schütt- und Mattendichten für im Spanplattenprozess genutzte Spanmaterialien (gegliedert von grob (Mittelschicht) nach fein (Schleifstaub)). In Anlehnung an eine tabellarische Übersicht von Niemz und Sandberg (2022, S. 386)	14
Tabelle 4 Auflistung von Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von Spanplatten aus alternativen Rohstoffen untersuchen. Alphabetische Gliederung nach dem verwendeten Hauptrohstoff	17
Tabelle 5 Auflistung von Studien, die den Einfluss der Spangeometrie auf die Eigenschaften von bindemittelfreien oder zementgebundenen Spanplatten untersuchen	18
Tabelle 6 Ergebnisse der 3D-Vermessung der abgeseibten Deckschichtspäne sowie Mittelschichtspäne, aus denen die in der Untersuchung betrachteten Plattentypen hergestellt wurden	30
Tabelle 7 Details zu den in Publikation 1 untersuchten Plattentypen	30
Tabelle 8 Ergebnisse der 3D-Vermessung des Referenzmaterials sowie der Spanfraktionen, aus denen die in der Untersuchung betrachteten Plattentypen hergestellt wurden	32
Tabelle 9 Details zu den in Publikation 2 untersuchten Plattentypen	32

Publikation 1

Engehausen N, Benthien JT, Lüdtke J (2024).
Influence of particle size on the mechanical properties of single-layer particleboards.
Fibers, 12(4), 32.
<https://doi.org/10.3390/fib12040032>

Publikation 2

Engehausen N, Benthien JT, Lüdtke J (2025).
Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard.
European Journal of Wood and Wood Products, 83(3), 123.
<https://doi.org/10.1007/s00107-025-02275-3>

Eingereichtes Manuskript

Engehausen N, Benthien JT, Lüdtke J, Rief S, Kabel M, Krause A, Hesse L.
X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation.

Publikation 1

Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards

Nick Engehausen *, Jan Thore Benthien and Jan Lüdtkke

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Institute of Wood Research, 21031 Hamburg, Germany; jan.benthien@thuenen.de (J.T.B.); jan.luedtke@thuenen.de (J.L.)

* Correspondence: nick.engehausen@thuenen.de; Tel.: +49-40-73962-608

Abstract: While most of the influences on the mechanical properties of particleboard appear to have been investigated, there is a lack of knowledge about the influence of particle size or particle dimensions due to the absence of a suitable particle measuring technique. The introduction of laser-based 3D scanning technology makes it possible to automatically determine the dimensions, surface area, and volume of particles. In this study, the influence of particle size on the mechanical properties of particleboards was investigated. To isolate potentially overlapping influences, single-layer particleboards with a uniform density profile were produced and analyzed. The amount of adhesive specific to the surface of the (fine) face layer particles and (coarse) core layer particles was adjusted utilizing 3D scanning of the surface areas to ensure comparability despite changes in particle size. It was found that with increasing particle size, the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) increase, while the internal bond strength (IB) decreases. It is considered whether these effects result from a particle-size-dependent orientation of the particles in the board. Furthermore, it is shown that all the aforementioned properties increase with increasing surface-specific adhesive amounts. Examples are provided to demonstrate how such fundamental relationships can be utilized to enhance the particleboard production process.

Keywords: particleboard; particle size; particle dimensions; particle geometry; mechanical properties; process optimization; 3D Particleview



Citation: Engehausen, N.; Benthien, J.T.; Lüdtkke, J. Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards. *Fibers* **2024**, *12*, 32. <https://doi.org/10.3390/fib12040032>

Academic Editor: Peter Niemez

Received: 20 December 2023

Revised: 5 March 2024

Accepted: 12 March 2024

Published: 2 April 2024



Copyright: © 2024 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 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

With an annual global production volume of 105.3 million m³ in 2022 [1], particleboard represents a fundamental wood-based composite material in commercial applications. Its widespread use in the furniture and construction industries highlights its importance as a cost-efficient alternative to solid wood and plywood. The production of particleboard involves a complex process, wherein the preparation of wood particles plays a substantial role and contributes significantly to the total production costs [2]. Understanding the influence of particle dimensions is essential, as they affect board properties [3]. Therefore, comprehending the impact of particle size on board properties is of significant importance for optimizing production processes in terms of efficiency and ensuring consistent quality.

While the variables that influence the properties of particleboard appear to have been widely investigated, there are inevitable gaps in the knowledge of the influence of particle dimensions. The primary reason for this limitation is that, to date, particle dimensions have been assessable only through undifferentiated sieve analysis to an insufficient extent using 2D image analysis or with immense personnel expenditure through manual individual measurements. In the case of 3D image analysis based on free-falling particles, different results are obtained for repetitively measured particles depending on their orientation to the cameras. Previous research approaches shared a common limitation in that their test setups did not enable an isolated examination of the effect of particle dimensions, despite a fundamental absence of appropriate particle measurements. Their results are therefore

obscured by parameters that have well-known influences on board properties. These are board density [4–6], distinctive density profile [7], multi-layered board structure (different particle sizes in face and core layer), obvious particle-size distribution perpendicular to the board plane, adhesive content (AC) [3] (pp. 786–789), and surface-specific adhesive amount (SSAA) [2]. For an isolated investigation, these parameters have to be kept constant.

For example, Istek et al. [8] investigated three-layer particleboards with varying particle dimensions in the face and core layers by using different sieve fractions. Due to the production parameters (press temperature: 180 °C; press duration: 190 s), it is likely that the boards possess distinctive density profiles that vary with the applied particle material and thus obscure the influence of the particle size. Furthermore, the inevitable change in the SSAA with variation in the particle dimensions was not taken into account. The bending properties increased with increasing face and core layer particle size. The IB increased with increasing core layer particle size, whereas changing the surface layer particle size did not lead to a significant increase in IB. Niemz and Sonderegger [9] provide insights into the relationship between particle dimensions and board properties, although they provide no details on the chosen experimental setup. They note an increase in the MOR with increasing particle length and a decrease with particle width and thickness. The MOR and MOE increase up to a slenderness ratio (defined as the ratio of length to thickness) of approximately 100. Further, the IB decreases with increasing particle length and width and reaches a maximum at moderate (not defined in detail) particle thicknesses. Arabi et al. [10] investigated single-layer particleboards made of three different sieve fractions of poplar particles and found an increase in the bending properties with an increasing slenderness ratio, while the opposite was found for IB. With the chosen production parameters (press temperature: 180 °C; press duration 5 min), the particleboards must have had a distinctive density profile and therefore were unsuitable for assessing the isolated influence of particle size. Arabi et al. [11] obtained similar results for the relationship between the slenderness ratio and the mechanical properties of particleboard by applying the response surface method. Post [12] analyzed boards made of particles with varying dimensions and a constant SSAA (but a distinctive density profile due to a press temperature of 135 °C and a press duration of 15 min) and found an increase in the bending properties with an increasing slenderness ratio of up to 300. In contrast, Kitahara and Kasagi [13] found an increase in the bending properties with decreasing particle size while investigating boards made of particles of proportionally different sizes (uniform shape), keeping the SSAA constant. Kimoto et al. [14] made single-layer particleboards of particles of different sizes and with a distinctive density profile (press temperature: 130 °C; press duration: 18 min) without keeping the SSAA constant. They found an increase in the MOR and a decrease in the IB when increasing the slenderness ratio up to 100.

In all the described research approaches, the test setups did not allow an investigation of the isolated influence of the particle size. Therefore, the main aim of the present study was to investigate the isolated influence of the particle size on the mechanical properties of particleboard without the overlapping effects of the following:

- A multi-layered board structure (different particle sizes in face and core layers);
- A distinctive density profile (perpendicular to the board plane);
- A changing specific amount of adhesive caused by a change in surface area (SSAA).

This was achieved by producing and investigating single-layer particleboards with a uniform density profile and a defined SSAA made from (fine) face layer particles (FLPs) and (coarse) core layer particles (CLPs) obtained from an industrial particleboard manufacturer.

In this paper, a comprehensive investigation into the impact of particle size on particleboard properties is presented. The recently developed 3D Particleview (Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG (GreCon), Alfeld, Germany) measurement technology is used, which automatically determines the dimensions, surface, and volume of particles and enables one to calculate the material-specific surface area (mm^2/g) and, thus, the SSAA (g/m^2). The MOR and MOE were found to increase with increasing particle size,

while the opposite applies to the IB. Such data regarding basic correlations are crucial for process optimization.

2. Materials and Methods

2.1. Wood Particles and Adhesive

The wood particles used in this study were FLPs and CLPs supplied by the particle-board manufacturer Pfeleiderer Deutschland GmbH, Neumarkt, Germany. They were taken from the material flow after drying and before gluing.

The FLPs were sieved in preparation for the measurement by using an Allgaier TSM 600/3 sieve machine (Allgaier-Werke GmbH, Uhingen, Germany) with a sieve insert of 1 mm mesh size. The particles were dried in a laboratory convection dryer at 103 °C to a residual moisture content (MC) of approximately 1% and packed in airtight polyethylene bags for intermediate storage.

The adhesive used was urea formaldehyde (UF) adhesive with 66% solid content, a pH of 7.5 to 9, viscosity of 400 to 600 mPa·s (at 20 °C), and a gel time of 40 to 60 s (at 100 °C). An ammonium nitrate solution with 40% solid content was used as the hardener.

2.2. Determination of Particle Moisture Content

The particle moisture content (MC) was determined by using a thermogravimetric moisture analyzer Sartorius MA 35 (Sartorius AG, Göttingen, Germany).

2.3. Three-Dimensional Particle Measurement

To determine the particle dimensions, the particle surface and the particle volume, an automated laser scanner (3D Particleview (GreCon)) with version 1.0.0.0 of the software was used. The resolution of the measuring device is 0.1 mm in length and width and 0.02 mm in thickness. Thus, to ensure a reliable measurement, the FLPs were sieved. The chosen measurement mask was “min. area 1 mm²”, the conveyor belt speed was set to 15 m/min, the first vibratory feeder was set to 16%, and the second vibratory feeder was set to 45% of the maximum available vibration rate.

FLPs and CLPs were measured by using triple determination. Each measuring run weighed approximately 5 g for FLPs. To ensure that a similar number of particles was measured for CLPs, a weight of 24 g was selected based on the number of particles per gram.

In addition to measuring particle length, width, thickness, and surface, the slenderness ratio (length divided by thickness), width ratio (length divided by width), and flatness (width divided by thickness) were calculated for each individual particle. The mean values are provided in Section 3.

2.4. Calculation of SSAA

The SSAA was calculated on the basis of the dry particle mass, the AC (mass of solid adhesive in relation to dry particle mass), and the surface area per gram (dry particles), following Equation (1),

$$\text{SSAA} = (\text{dry wood mass} \times \text{AC}) / \text{surface area per gram}, \quad (1)$$

while the surface area per gram was calculated as the quotient of surface area and dry particle mass.

2.5. Mat Center Temperature Measurement

Thermocouples were used to check the temperature at the center of two additional test boards, one made from FLPs and the other made from CLPs. Three thermocouples were placed at the center of each test board during scattering. The mat temperature was documented during pressing by using the laboratory hot press's integrated data logger. This allowed for verification that the adhesive was fully cured and the particle mat center had reached a minimum temperature of 100 °C.

2.6. Particleboard Manufacturing

Single-layer particleboards were produced using a computer-controlled laboratory hot press, Siempelkamp Typ 2 (G. Siempelkamp GmbH & Co. KG, Krefeld, Germany). The target density of the boards conditioned at 20 °C and 65% relative humidity (RH) was 650 kg/m³. The target board thickness was 15 mm. The target MC of the particle mat (mass of water in relation to dry mass of particle mat) was 7.1%. The AC varied from 8 to 5.3 and 12.2%; the corresponding SSAA were 8.2 and 12.5 g/m² (see Table 1). Before application, 6% hardener (mass of solid content in relation to dry particle mass) was added. Gluing of the particles was conducted by using a portable concrete mixer (Atika Maschinenfabrik Wilhelm Pollmeier GmbH & Co., Ahlen, Germany) with a drum diameter of 600 mm. The adhesive was transported through a silicone hose from the beaker to the nozzle (Schlick Mod. 940/5 0.8 mm W38558 (Düsen-Schlick GmbH, Untersiemau/Coburg, Germany)) with an orifice of 1.8 mm by using a Watson-Marlow 323 peristaltic hydraulic pump (Watson-Marlow GmbH, Rommerskirchen, Germany). The glue was applied by using a pressure of approximately 5 bar onto the falling stream of particles at the center of the rotating drum. The amount of additional water was calculated with regard to particle moisture content and added with an atomizer before applying the adhesive to the particles in the rotating drum. The particle MC was unified in this manner, rather than by adding water to the adhesive beforehand, ensuring a uniform viscosity during all tests. Furthermore, by scattering the particle mat in excess, the desired density was achieved despite the mat's lateral deflection during the pressing process.

Table 1. Details on the different board types produced. (CLPs = core layer particles, FLPs = face layer particles, AC = adhesive content, and SSAA = surface-specific adhesive amount).

Board Type (BT)	Particle Material	AC	SSAA
1	CLPs	8%	12.5 g/m ²
2	FLPs	8%	8.2 g/m ²
3	FLPs	12.2%	12.5 g/m ²
4	CLPs	5.3%	8.2 g/m ²

The particles were weighed and scattered in a forming mold of 585 × 400 mm positioned on an aluminum caul plate covered with siliconized paper to prevent adherence between the board and caul plates. The finished scattered particle mat was pre-compacted before the forming mold was removed. After removing the forming mold, the particle mat was covered with a second siliconized paper and transferred to the laboratory hot press.

In order to obtain particleboards with a uniform density profile, the cold particle mat was compacted to a thickness of 15 mm with a closing time of 30 s and a pressure limited to 230 bar in the hot press. During the following 60 min, the distance was kept constant at a pressure limited to 120 bar, while the press temperature was steadily increased to 120 °C. After hot pressing, the boards were cooled at ambient conditions, edge-trimmed to 515 × 330 mm, and then stored in a climate chamber at 20 °C and 65% RH before sample cutting.

2.7. Test Specimen Preparation

According to the cutting plan shown in Figure 1, for BT 1 to BT 4,

- Six test specimens were cut ((350 × 50 × 15) mm) for MOR and MOE determination;
- Twelve test specimens were cut for ((50 × 50 × 15) mm) the determination of the IB.

Between cutting and testing, the test specimens were stored in a climate chamber at 20 °C and 65% RH.

To confirm that the board preparation process yields boards with uniform density profiles, three samples measuring 50 × 50 × 15 mm were cut from each board. The samples were taken from the edges of the examined bending specimens, and density scans were performed.

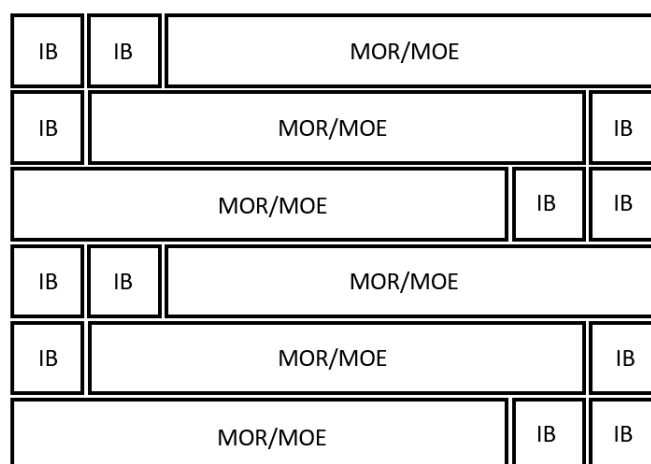


Figure 1. Cutting plan applied for BT 1 to BT 4. (IB = internal bond strength, MOR = modulus of rupture, MOE = modulus of elasticity).

2.8. Board Density Determination

The board density was determined according to [15].

2.9. Density Profile Determination

Density profiles (density distribution perpendicular to the board plane) were determined using a Dense-Lab X laboratory density scanner (Electronic Wood Systems GmbH, Hameln, Germany) with the resolution set to 20 (0.36 mm/s).

2.10. Horizontal Density Distribution

The distribution of the density in the horizontal direction of the board was determined by calculating the bulk densities of all bending and IB test specimens for each test board. The absolute value of the deviation (AVD) from the mean value of the tested specimens per test board was set in relation to the mean value (of all test specimens per board) and given as a percentage, following Equation (2).

$$\text{Density deviation} = (\text{AVD}/\text{Mean value}) \times 100 \quad (2)$$

2.11. MOR, MOE, and IB Determination

The MOR and MOE were determined according to [16]. IB was determined according to [17].

2.12. Experimental Design

Four types of board, each produced in triplicate, were manufactured. The boards were composed of varying particle materials (FLPs, CLPs) and SSAAs (8.2 g/m², 12.5 g/m²) (see Table 1). For board type (BT) 1, the SSAA calculation was based on the surface area of the CLPs along with an AC of 8%. Similarly, for BT 2, the SSAA calculation was based on the surface area of FLPs and an AC of 8%. The AC for BT 3 was calculated by using the SSAA of BT 1, in combination with the surface area of FLPs. Similarly, the AC for BT 4 was calculated by using the SSAA of BT 2, along with the surface area of CLPs, in accordance with Equation (3):

$$\text{AC} = ((\text{SSAA} \times \text{surface area per gram})/\text{dry particle mass})/100 \quad (3)$$

The FLPs served as a particle material with a small particle size, and the CLPs served as a particle material with a large particle size.

In order to investigate the influence of particle size on the board properties, the SSAA of BT 1 (CLP) selected was the same as that of BT 3 (FLP), and that of BT 4 (CLP) was the

same as that of BT 2 (FLP). The different surface areas of the particle materials resulted in different ACs.

From the combined consideration of the board properties of BT 1 and BT 3, as well as BT 2 and BT 4, the influence of particle size on the board properties can be deduced since, in addition to the density, the SSAA was kept constant.

From the consideration of BT 1 and BT 4, as well as BT 2 and BT 3, the influence of the SSAA can be derived since the particle size was kept constant.

2.13. Statistical Analysis

Statistical analysis and graphical representation of the experiments were carried out by using the JMP 16 analysis tool (SAS, Cary, NC, USA) and Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corporation, Redmond, DC, USA), respectively.

Each dataset was checked for extreme outliers by applying the interquartile range (IQR) method, with the IQR being the difference between the third quartile (Q₃ or 75% quantile) and the first quartile (Q₁ or 25% quantile). As the lower criterion for defining an extreme outlier, the first quartile minus the triple IQR (Q₁ – 3 IQR) was used; as the upper criterion for defining an extreme outlier, the third quartile plus the triple IQR (Q₃ + 3 IQR) was used. In the case of a detected extreme outlier, all data available for this test specimen were excluded from the evaluation.

The selection of appropriate tests for statistical data analysis was carried out according to a statistical decision path given by Benthien et al. [18], which is shown in Figure 2. All statistical tests were carried out at a significance level of α = 0.05.

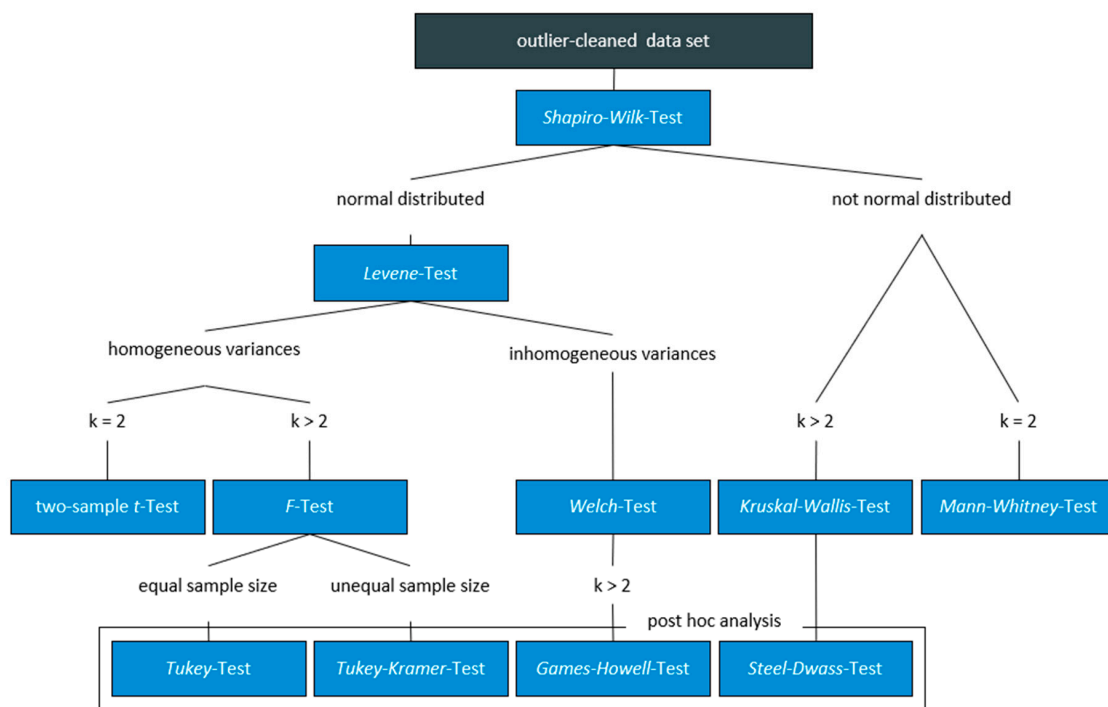


Figure 2. Scheme for selecting a suitable test for statistical data analysis given by Benthien et al. [18].

2.14. Shift of Data to Targeted Board Density

Between excluding extreme outliers and conducting further statistical evaluation, the values for the mechanical board properties were adjusted to match the target density. This was achieved by calculating a linear regression between specimen density and strength, which was then applied to each board type to bring the corresponding strength to the level matching the board’s target density (Equation (4)).

$$\text{Adjusted property} = ((\text{Target density} - \text{Achieved density}) \times \text{Slope}) + \text{Property} \quad (4)$$

3. Results

3.1. Three-Dimensional Particle Measurement

Table 2 presents the results of the 3D particle measurement. Regarding FLPs, in total, 52,306 particles were measured, while there were 59,024 CLPs. For the FLPs, the mean length, width, and thickness are 2.0, 0.9, and 0.23 mm; for the coarser CLPs, they are 3.6, 1.1, and 0.33 mm. The mean slenderness ratio, width ratio, and flatness are 10.1, 2.4, and 4.4 for the FLPs and 12.9, 3.4, and 4.0 for the CLPs. Compared to the CLPs, the FLPs have a higher surface area per gram (9734 versus 6389 mm²/g).

Table 2. Results of the 3D particle measurements. (FLPs = face layer particles; CLPs = core layer particles).

Particle Material	Sample Weight (g)	Length * (mm)	Width * (mm)	Thickness * (mm)	Specific Surface Area (mm ² /g)
FLPs	(3 times) 5	2.0 (±44.5%)	0.9 (±31.3%)	0.23 (±39.7%)	9734
CLPs	(3 times) 24	3.6 (±74.8%)	1.1 (±67.0%)	0.33 (±79.9%)	6389

* Mean value (±coefficient of variation).

3.2. Verification of Press Program Suitability and Board Characteristic Achievement

Both the FLPs and the CLPs required a maximum of 53 min for the mat center temperature to reach 100 °C (the maximum value recorded by the six thermocouples).

The greatest percentage density deviation was located in an IB test specimen at the very edge of board 1 of BT 1 with a deviation of 13.7%. The mean density deviation for each test board varied from 1.6% (board 2 of BT 3) to 4.6% (board 2 of BT 1).

Figure 3 shows an exemplary density profile of an FLP board. In all cases, the intended uniform density profile was achieved.

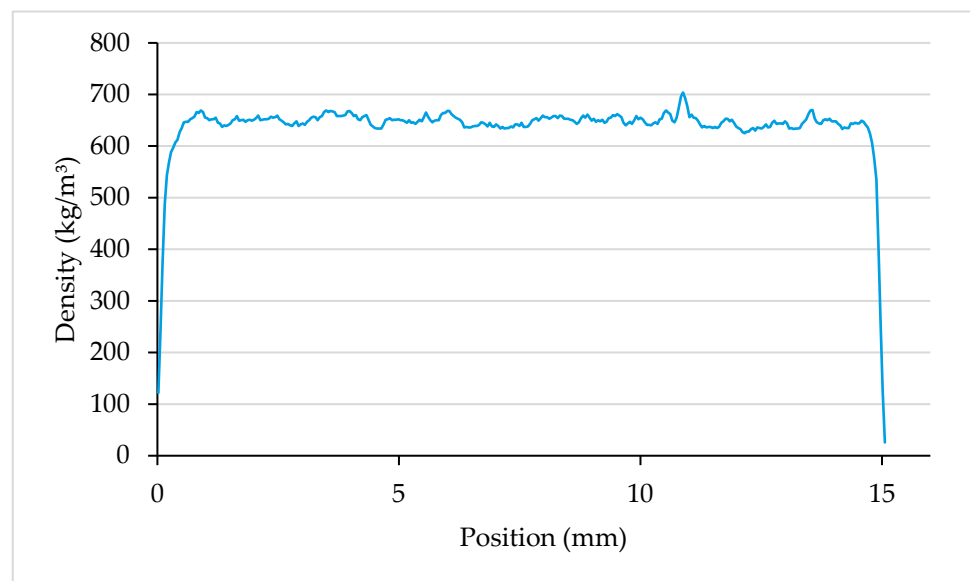


Figure 3. Exemplary density profile for an FLP (face layer particle) board.

3.3. Main Experiments

No extreme outliers were detected in any of the considered datasets following IQR outlier detection. Since density-compensated mean values were considered for further evaluation, density data are given in the Supplementary Materials.

Table 3 presents the outcomes of the bending and internal bond tests conducted on BT 1, BT 2, BT 3, and BT 4. For the properties shown, a comparative assessment of the mean values between the individual boards for each board type is provided in capital

letters. Statistically significant differences exist between the mean values annotated with different letters.

Table 3. Density-compensated (650 kg/m^3) mean values (\pm coefficient of variation) for modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB) for all manufactured boards, as well as the results of a comparison between the mean values for each board type (homogeneous groups represented by uppercase letters) (CLPs = core layer particles, FLPs = face layer particles, AC = adhesive content, and SSAA = surface-specific adhesive amount).

Board Type (BT)	Board	Particle Material	AC (%)	SSAA (g/m^2)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	IB (N/mm^2)
1	1	CLPs	8	12.5	10.1 ($\pm 3\%$) A	1639 ($\pm 2\%$) A, B	0.81 ($\pm 5\%$) A
	2	CLPs	8	12.5	10.2 ($\pm 6\%$) A	1668 ($\pm 4\%$) A	0.87 ($\pm 4\%$) B
	3	CLPs	8	12.5	9.9 ($\pm 5\%$) A	1598 ($\pm 1\%$) B	0.87 ($\pm 4\%$) B
2	1	FLPs	8	8.2	6.9 ($\pm 2\%$) A	1148 ($\pm 2\%$) A	0.97 ($\pm 4\%$) A
	2	FLPs	8	8.2	6.8 ($\pm 3\%$) A	1181 ($\pm 2\%$) A	1.06 ($\pm 3\%$) B
	3	FLPs	8	8.2	6.9 ($\pm 5\%$) A	1157 ($\pm 2\%$) A	0.99 ($\pm 3\%$) A
3	1	FLPs	12.2	12.5	7.1 ($\pm 5\%$) A	1213 ($\pm 3\%$) A	1.21 ($\pm 6\%$) A
	2	FLPs	12.2	12.5	7.3 ($\pm 2\%$) A	1227 ($\pm 1\%$) A	1.34 ($\pm 4\%$) B
	3	FLPs	12.2	12.5	7.2 ($\pm 5\%$) A	1195 ($\pm 1\%$) A	1.34 ($\pm 3\%$) B
4	1	CLPs	5.3	8.2	8.2 ($\pm 5\%$) A	1417 ($\pm 1\%$) A	0.60 ($\pm 3\%$) A
	2	CLPs	5.3	8.2	8.6 ($\pm 7\%$) A	1491 ($\pm 4\%$) A, B	0.65 ($\pm 4\%$) B
	3	CLPs	5.3	8.2	8.8 ($\pm 5\%$) A	1494 ($\pm 4\%$) B	0.68 ($\pm 4\%$) C

A comparison of the mean MOR of individual boards of the same board type showed no statistically significant differences. The mean MOEs showed statistically significant differences between the individual boards of BT 1 and BT 4, while the mean IBs are statistically different between the individual boards of BT 1, BT 2, BT 3, and BT 4. To be able to make a more reliable statement about the influence of particle size and SSAA on the mechanical properties, the mean values for each board type are used as follows.

In addition to the mean values for the mechanical properties of each board type, Table 4 presents the results of pairwise mean value comparisons on the influence of particle size and SSAA on MOR, MOE, and IB. The mean values for MOR, MOE, and IB vary significantly between the different board types depending on the particle material and SSAA.

A comparison between BT 3 and BT 1 shows the influence of particle size, as both have an identical SSAA of 12.5 g/m^2 but are made from fine and coarse particles, respectively. The fine FLP board BT 3 shows a significantly lower MOR and MOE than the coarse CLP board BT 1. The opposite was observed for the IB. For BT 3, the values for MOR, MOE, and IB are $7.2 (\pm 4\%)$, $1212 (\pm 2\%)$, and $1.30 (\pm 6\%) \text{ N/mm}^2$, respectively. In contrast, for BT 1, the values are $10.0 (\pm 5\%)$, $1635 (\pm 3\%)$, and $0.85 (\pm 5\%) \text{ N/mm}^2$. The same coherences are found by comparing BT 2 and BT 4, both of which were produced with a constant SSAA of 8.2 g/m^2 while varying the material from FLPs to CLPs.

A comparison of BT 2 and BT 3, which are both FLP boards but were produced with SSAAs of 8.2 g/m^2 and 12.5 g/m^2 , respectively, shows the influence of the SSAA on the mechanical properties. BT 2, produced with an SSAA of 8.2 g/m^2 , has a statistically significantly lower MOR, MOE, and IB compared to BT 3, produced with an SSAA of 12.5 g/m^2 . For BT 2, the MOR, MOE, and IB are $6.9 (\pm 3\%)$, $1162 (\pm 2\%)$, and $1.01 (\pm 5\%) \text{ N/mm}^2$, while for BT 3, they are $7.2 (\pm 4\%)$, $1212 (\pm 2\%)$, and $1.30 (\pm 6\%) \text{ N/mm}^2$. The same statistically significant coherences were found when comparing BT 4 and BT 1, both made of CLPs, when changing the SSAA from 8.2 to 12.5 g/m^3 .

Table 4. Density-compensated (650 kg/m^3) mean values (\pm coefficient of variation) for modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB) for all board types, as well as the results of pairwise mean value comparisons for investigating the influence of particle size and surface-specific adhesive amount (SSAA) (homogenous groups represented by uppercase letters) (FLP = face layer particle, CLP = core layer particle, MOR = modulus of rupture, MOE = modulus of elasticity, and IB = internal bond strength).

Board Type (BT)	Material	SSAA (g/m^2)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	IB (N/mm^2)
3	FLPs	12.5	7.2 ($\pm 4\%$) A	1212 ($\pm 2\%$) A	1.30 ($\pm 6\%$) A
1	CLPs	12.5	10.0 ($\pm 5\%$) B	1635 ($\pm 3\%$) B	0.85 ($\pm 5\%$) B
2	FLPs	8.2	6.9 ($\pm 3\%$) A	1162 ($\pm 2\%$) A	1.01 ($\pm 5\%$) A
4	CLPs	8.2	8.5 ($\pm 6\%$) B	1467 ($\pm 4\%$) B	0.65 ($\pm 7\%$) B
2	FLPs	8.2	6.9 ($\pm 3\%$) A	1162 ($\pm 2\%$) A	1.01 ($\pm 5\%$) A
3	FLPs	12.5	7.2 ($\pm 4\%$) B	1212 ($\pm 2\%$) B	1.30 ($\pm 6\%$) B
4	CLPs	8.2	8.5 ($\pm 6\%$) A	1467 ($\pm 4\%$) A	0.65 ($\pm 7\%$) A
1	CLPs	12.5	10.0 ($\pm 5\%$) B	1635 ($\pm 3\%$) B	0.85 ($\pm 5\%$) B

4. Discussion

The main aim of this study was to investigate the isolated influence of particle size on the mechanical properties of particleboards by excluding confounding effects of other influencing variables.

For both a low (8.2 g/m^2) and high (12.5 g/m^2) SSAA, the MOR and MOE increased with a change in particle size from fine to coarse. The opposite applies for the IB, even if the (mass-specific) AC is kept at a constant level of 8%, which even equates to a higher SSAA for CLPs. Consequently, it appears that coarse particles are beneficial for a high MOR and MOE, while fine particles are advantageous for a high IB.

The correlation between particle size and bending properties seems plausible, as can be easily understood by comparing the particle sizes and bending properties of oriented strand board (OSB) and particleboard. The results of the IB are less easy to interpret, considering that Sackey et al. [19] found that the admixture of coarse particles in the core layer leads to an increased IB. It is, therefore, possible that the relationship between particle size and IB is influenced by another variable, for example, the particle shape and presumably, in consequence, particle orientation.

From the particle measurements, one can determine to what extent the dimensions of the surface and core layer particles differ from each other (see Table 2). Based on these data, the ratios of dimensions to each other (length to width to thickness) can be calculated and specified as follows:

- FLPs: 1 to 0.5 to 0.1;
- CLPs: 1 to 0.3 to 0.1.

The following values of slenderness ratios, width ratios, and flatness, respectively, were obtained:

- FLPs: 10.1, 2.4 and 4.4;
- CLPs: 12.9, 3.4 and 4.0.

It can be seen that the particle sizes in the present study were not varied with a constant particle shape, as was the case in [13], but the dimensions were varied disproportionately to each other. It is conceivable that this leads to a different orientation of the particles in the board and obscures the effects of the particle size.

It can be further assumed that coarse particles, due to their higher slenderness ratio, tend to be oriented parallel to the board plane during scattering. Fine, more cubic particles with a lower slenderness ratio tend to be oriented more randomly and are also perpendicular to the board plane. According to Niemz and Wenk [20], the longitudinal wood anatomical direction is predominantly oriented parallel to the longitudinal axis of

the particles, which leads to the highest strength properties in the axial direction. This fact, together with the aforementioned shape-dependent orientation of the particles during scattering, could explain the increase in bending properties with increasing particle size and also the increase in the IB with decreasing particle size. In both cases, the particles are predominantly strained in the axial direction. However, this theory is only valid if the break occurs in the wood and not in the adhesive joint, which has not been investigated in the present study. The aforementioned approach could be substantiated by May [21], who found increased IB values when particles are oriented vertically in the core layer.

Further, an increase in all investigated board properties (MOR, MOE, IB) was found when increasing the SSAA from 8.2 g/m² to 12.5 g/m² within one material type (FLPs or CLPs, respectively). This reflects the well-known (positive) correlation between AC and board properties. The increase in MOE, MOR, and IB with increasing SSAA can be attributed to the availability of more adhesive in relation to the particle surface, resulting in better interconnection between the particles.

Many existing studies have (unwittingly) investigated not the influence of particle size, but rather the influence of the SSAA. This is because the AC was kept constant for particles of different sizes; hence, the SSAA was unintentionally changed. If, for example, the particle size is increased while the AC is kept constant, the total particle surface decreases and the SSAA increases, which—as shown by the presented results—leads to an increase in all considered board properties.

A comparison of this study's results with prior studies has proven challenging due to this fact. However, if the different methodologies are disregarded, similarities can be observed. For example, various studies have shown a correlation between an increase in bending properties and either an increase in particle size [8] or an increase in slenderness ratio [9–12,14]. Other studies similarly found an increase in the IB with a decrease in the slenderness ratio [10,11,14]. In contrast, a study on the effect of particle size on bending properties [13] produced results that contradict the results of this study. The partly contradictory results of other studies are presumably due to the different methodologies, which attenuate the comparability.

The basic relationships presented here represent an important basis for the optimization of particleboard processes with regard to cost- and material-efficient production. If, for example, particles with high slenderness ratios are used, boards with conventional properties can be produced with a lower wood input and a lower density. Furthermore, by integrating 3D particle measurements into the process, it may be possible, for example, to counteract poor mechanical board properties because of an unintentional decrease in particle size (e.g., through wear of the knife ring flakers) by increasing the specific amount of adhesive.

Nevertheless, it should be noted that the results presented in this study are valid only for two different particle sizes. Further investigations with multiple fractions would be useful to substantiate the fundamental relationships discussed here. The method presented offers significant benefits, not only in terms of enhancing efficiency but also in predicting board properties. This prediction is possible once the causal link between individual influences and resultant properties is well understood. The approach should be viewed as a significant shift in how the outcomes of property analyses have been historically attributed to numerous overlapping factors. Further research should therefore focus on the impact of particle dimensions, rather than only the impact of particle size, on particleboard properties, given the availability of data from 3D particle measurement techniques.

5. Conclusions

From the present study, the following conclusions can be drawn:

1. MOR, MOE, and IB increase when increasing the SSAA from 8.2 g/m² to 12.5 g/m² within one material type (FLPs or CLPs, respectively).
2. For both a low (8.2 g/m²) and high (12.5 g/m²) SSAA, the MOR and MOE increase with a change in particle size from fine to coarse.

3. For both a low (8.2 g/m²) and high (12.5 g/m²) SSAA, the IB decreases with a change in particle size from fine to coarse.
4. In the present study, the particle sizes were not varied with a constant particle shape, but the dimensions were varied disproportionately to each other. It is conceivable that varying slenderness ratios, width ratios, and flatness, respectively, can lead to a different orientation of the particles in the board and thus different mechanical properties.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/fib12040032/s1>. Excel file: Raw data.

Author Contributions: Conceptualization, N.E. and J.T.B.; methodology, N.E. and J.T.B.; investigation, formal analysis N.E. and J.T.B.; writing—original draft preparation, N.E.; writing—review and editing, N.E., J.T.B. and J.L.; project administration, J.L.; funding acquisition, N.E., J.T.B. and J.L. 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 the research project “Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenherstellung” (Three-dimensional particle measurement and process integration in particleboard production), funding code 2220HV090X.

Data Availability Statement: The data presented in this study are included in the article or have been made available through the Supplementary Materials.

Acknowledgments: The authors would like to thank all those colleagues who were engaged in the experimental realization and data analysis, namely, Johannes Beruda (Hamburg University, Hamburg, Germany), Dörte Bielenberg, Lena Falke, Sabrina Heldner, Nora Kalz, Kristin Ploch, Bettina Steffen (all Thünen Institute of Wood Research), and Christina Waitkus (Thünen Institute, Photography).

Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflicts of interest. Due to the formulation of the call for proposals by the project-executing agency, the funder had a 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.

References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), FAOSTAT, Forestry, Forestry Production and Trade. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (accessed on 10 October 2023).
2. Benthien, J.T.; Sieburg-Rockel, J.; Engehausen, N.; Koch, G.; Lüdtke, J. Analysis of Adhesive Distribution over Particles According to Their Size and Potential Savings from Particle Surface Determination. *Fibers* **2022**, *10*, 97. [[CrossRef](#)]
3. Dunky, M.; Niemz, P. *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren [Wood-Based Materials and Adhesives: Technology and Influencing Factors]*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002; pp. 18–21, 645–927, ISBN 978-3-642-55938-9.
4. Plath, E. Einfluß der Rohdichte auf die Eigenschaften von Holzwerkstoffen [Influence of Density on the Properties of Wood-based Materials]. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **1963**, *21*, 104–108. [[CrossRef](#)]
5. 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.
6. Liiri, O. Investigations on properties of wood particle boards. *Pap. Puu* **1961**, *43*, 3–18.
7. Wong, E.D.; Zhang, M.; Wang, Q.; Kawai, S. Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Sci. Technol.* **1999**, *33*, 327–340. [[CrossRef](#)]
8. 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. 26–29.
9. Niemz, P.; Sonderegger, W. *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe [Wood Physics: Physics of Wood and Wood-based Materials]*; Carl Hanser Verlag: München, Germany, 2017; pp. 61–62.
10. Arabi, M.; Faezipour, M.; Layeghi, M.; Enayati, A.A. Interaction analysis between slenderness ratio and resin content on mechanical properties of particleboard. *J. For. Res.* **2011**, *22*, 461–464. [[CrossRef](#)]
11. Arabi, M.; Haftkhani, A.R.; Pourbaba, R. Investigating the effect of particle slenderness ratio on optimizing the mechanical properties of particleboard using the response surface method. *BioResources* **2023**, *18*, 2800–2814. [[CrossRef](#)]
12. Post, P.W. Effect of Particle Geometry and Resin Content on Bending Strength of Oak Flake Board. *For. Prod J.* **1958**, *8*, 317–322.

13. Kitahara, K.; Kasagi, K. Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chip-board. *Wood Ind.* **1955**, *10*, 406–412.
14. Kimoto, K.; Ishimori, E.; Sasaki, H.; Maku, T. *Studies on the Particle Boards: Report 6: Effects of Resin Content and Particle Dimension on the Physical and Mechanical Properties of Low-Density Particle Boards*; Kyoto University Research Information Repository: Kyoto, Japan, 1964; Volume 32.
15. *DIN EN 323:1993*; Wood-Based Panels; Determination of Density. German Version; European Standards s.r.o.: Plzen, Czech Republic, August 1993.
16. *DIN EN 310:1993*; Wood-Based Panels; Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength. German Version; European Standards s.r.o.: Plzen, Czech Republic, August 1993.
17. *BS EN 319:1993*; Particleboards and Fiberboards; Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board. European Standards s.r.o.: Plzen, Czech Republic, April 1993.
18. Benthien, J.T.; Ohlmeyer, M. Effects of flat-shaped face layer particles and core layer particles of intentionally greater thickness on the properties of wood-reduced particleboard. *Fibers* **2020**, *8*, 46. [[CrossRef](#)]
19. 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**, *2*, 214–224.
20. Niemz, P.; Wenk, S. Kenngrößen zur Beurteilung von Spangemischen und deren Meßbarkeit [Parameters for assessing particle mixtures and their measurability]. *Holztechnologie* **1989**, *30*, 117–122.
21. May, H.A. Herstellung von Holzspanplatten mit orientierten Spänen und unterschiedlicher Formgebung [Production of particleboard with oriented particles of different shapes]. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **1974**, *32*, 169–176. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Publikation 2



Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard

Nick Engehausen¹ · Jan T. Benthien¹ · Jan Lüdtkke¹

Received: 18 December 2024 / Accepted: 20 May 2025
© The Author(s) 2025

Abstract

Particleboard properties result from a variety of material and process-related parameters. While many of them have been extensively investigated, there is a notable lack of knowledge regarding the influence of the particle geometry. This is due to a longstanding lack of suitable measurement technologies and, in the investigation, unintentional overlapping of other interference factors. In the present study, the influence of particle size and surface-specific adhesive amount (SSAA) on the formation of particleboard properties was investigated. Laser-based 3D scanning technology was used to determine the dimensions and the specific particle surface area of particles of different sieve fractions, from which different types of boards were produced. This approach allowed the SSAA to either be maintained at a constant level for boards made from different sieve fractions (influence of particle size) or to be specifically adjusted for boards made from a single fraction (influence of SSAA). To further isolate the influence of particle size and SSAA from the interfering influences of an uneven distribution of particles of different size, adhesive and density, the boards were produced with a single-layer structure and a homogenous density profile. As particle size increased, a statistically significant reduction (all statistical tests were carried out at a significance level of $\alpha=0.05$) in modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE) and internal bond strength (IB) was observed, accompanied by an also statistically significant increase in thickness swelling (TS) and water absorption (WA). As the SSAA increased, the MOR, MOE and IB showed a corresponding statistically significant rise, while TS and WA significantly decreased. This knowledge of basic coherences (since significant interference factors were excluded) provides the basis for targeted process optimization in the production of particleboards.

1 Introduction

A parameter that significantly influences particleboard properties, but has long been given insufficient consideration in research and industry due to unsuitable or lacking measurement technology, is the particle geometry. In this context, the term particle geometry is used as a hypernym for particle size (as the result of sieving), dimensions (along the three major axes of the particle) and shape (course of

the particle external surface and ratio of the dimensions to one another). It is presumed that these parameters directly determine particleboard properties and indirectly influence the formation of them within production. For example, the isolated influence of the particle size on the internal bond strength (IB) can be seen as a direct influence. Indirectly, however, a change in particle size linked to a change in specific surface area also influences the amount of adhesive available to the particle surface and thus the interparticle bond. As the particle size decreases, the specific particle surface area (surface area/mass) increases due to the non-linear relationship between surface area and volume of geometric bodies known as surface-to-volume ratio. If, as is common in the particleboard industry, mass-specific gluing is applied, a decrease in particle size inevitably leads to a decrease in the surface-specific adhesive amount (SSAA), and thus interparticle bond.

✉ Nick Engehausen
nick.engehausen@thuenen.de
Jan T. Benthien
jan.benthien@thuenen.de
Jan Lüdtkke
jan.luedtke@thuenen.de

¹ Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany

Previous research approaches have a fundamental lack of a suitable particle measurement in common. Additionally, their test setups did not allow for an isolated consideration of the influence of the particle geometry. In many studies, the actual influence of the particle geometry is overlaid by variables whose influence is proven and known. These include board density (Liiri 1961; Plath 1963; Istek and Siradag 2013), a distinctive density profile (Wong et al. 1999), a multi-layer board structure (Keylwerth 1958), the mass-specific adhesive content (AC) (Dunky and Niemz 2002) and the SSAA (Engehausen et al. 2024).

Already in the 1950 s, authors investigated the influence of particle geometry on the properties of particleboard. Kitahara and Kasagi (1955) investigated the influence of particle dimensions on the properties of single-layer particleboard and, in contrast to many other authors, kept the SSAA for particles of different sizes constant. The cuboid particles were presumably produced from veneers, so that the particle length, width and thickness could be specifically adjusted and the dimensional ratios and particle shape could be kept constant when varying the particle sizes. They found a decrease in modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) and an increase in thickness swelling (TS) and water absorption (WA) with an increase in particle size. Post (1958) investigated the influence of the particle length, thickness and the slenderness ratio (length/thickness) on the MOR and kept the surface-specific adhesive amount constant, but worked with boards that had a distinctive density profile (press temperature of 135 °C and a press duration of 15 min.). According to his investigations, the MOR increases with the particle length and the degree of slenderness, while it decreases with increasing particle thickness. Brumbaugh (1959) investigated the influence of various parameters on the board properties of single-layer boards. He produced boards from particles with varying geometries, with the amount of glue calculated specifically to the mass of the particles and thus a varying SSAA. An increase in MOR with the particle length and the slenderness ratio was observed. Boards made from short, thick particles achieved high IB. An increase in particle thickness led to an increase in TS. Lirri (1960) varied the particle geometry in the production of three-layer boards, but also applied adhesive at a constant mass-specific rate. Among other things, he observed an increase in MOR and a decrease in TS as the length and width of the particles increased.

Even more recent studies allow only limited conclusions regarding the actual influence of the particle geometry on the board properties. For example, Istek et al. (2018) investigated the influence of particle size on various board properties of three-layer particleboards that were glued with different SSAA. They found an increase in bending properties with increasing particle size in the face or core layer.

The IB also increased with an increase in particle size in the core layer, while varying the particle size in the surface layers showed no influence on the IB. Benthien et al. (2019) investigated the properties of three-layer particleboards with targeted variation of the particle thickness in the core layer, whereby mass-specific gluing was applied and thus the surface-specific adhesive amount was varied. By increasing the particle thickness in the core layer, they observed an increase in IB. The influence on other mechanical properties was not significant. Rahman et al. (2019) investigated the properties of single-layer particleboard when varying the particle size, but also did not apply a constant SSAA. They found an increase in MOR, MOE, TS and WA with an increase in particle size. The particle size had no significant influence on the IB. Further, they found a decrease in TS and WA with increasing resin content. Röllig et al. (2024) came to similar results in tests on single-layer, mass-specifically glued particleboards and also found an increase in IB with an increase in particle size.

In addition to the studies listed above, many other studies show experimental approaches in which particles of different sizes were glued on a mass-specific basis and thus the SSAA was varied and/or boards (sometimes multi-layered) with a distinctive density profile were examined (Rackwitz 1963; Kimoto et al. 1964; Walter et al. 1979; Haselein et al. 2002; Miyamoto et al. 2002; Kasim et al. 2008; Yemele et al. 2008; Lias et al. 2014; Benthien and Ohlmeyer 2016; Farrokhpayam et al. 2016; Astari et al. 2018; Lui et al. Benthien et al. 2020; Arabi et al. 2023; etc.). The basic relationship between particle geometry and board properties cannot be clearly derived from this.

In own investigations (Engehausen et al. 2024) laser-based 3D scanning technology, which is also applied in the present study, was used to determine the specific particle surface area in order to keep the SSAA at a constant level for different particle materials. For single-layer particleboards, with homogeneous density profile made of face layer particles and core layer particles, an increase in particle size led to an increase in bending properties and a decrease in IB. However, it can be assumed that the specific particle surface area in the case of the face layer particles was underestimated. Even though the face layer particles were pre-screened using a 1 mm sieve, it can be assumed, that part of the fine material or dust adhered to particles, which was not detected by the automated laser scanner. Consequently, for face layer particles the SSAA was actually lower than for core layer particles, and in retrospect the direct influence of the particle size cannot be clearly derived here.

Hence, the aim of the present study was an isolated consideration of the influence of particle size and SSAA on mechanical and sorption properties of particleboard and to investigate them independently of other factors. For this

purpose, single-layer particleboards with a homogeneous density profile and specifically adjusted SSAA were produced from different particle fractions and tested for board properties. Laser-based 3D scanning technology was used on the one hand to assess the suitability of the particle material for the investigation and on the other hand to determine the specific particle surface area for adjusting the SSAA. The determined basic correlations between particle size and board properties form the basis for the efficient use of wood and adhesives in particleboard production.

2 Materials and methods

2.1 Wood particles and adhesive

The core layer particles used in this study were supplied by an industrial particleboard manufacturer. They were taken from the material flow after drying but before gluing. This material in its entirety was once used as reference. To the other, the particles were sieved using a TSM 600/3 tumbler screening machine (Allgaier-Werke GmbH, Uhingen, Germany) with a tower of six stacked sieve inserts of 1, 1.5, 2, 3, 4 and 8 mm mesh size to create sieve fractions with a particle size of 1–1.5 mm, 1.5–2 mm, 2–3 mm, 3–4 mm and 4–8 mm. The particles retained by the respective sieve insert are laterally discharged and constitute the respective

fraction. Particles <1 mm and >4 mm were ignored. A histogram showing the frequency density and cumulative distribution of particle sizes in the reference material is given in Fig. 1. All sieve fractions were dried in a laboratory convection dryer at 103 °C to a residual moisture content (MC) of approximately 1% and packed separately airtight in polyethylene bags for intermediate storage. The particle MC was determined by using a thermogravimetric moisture analyzer (Sartorius MA 35, Sartorius AG, Göttingen, Germany).

The adhesive used was a Silekol 124 urea formaldehyde (UF) adhesive (Silekol Sp. z o.o., Kędzierzyn–Koźle, Poland) with 66% solid content. An ammonium nitrate solution (Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Germany) with 40% solid content was used as hardener.

2.2 Three-dimensional particle measurement

To determine the particle dimensions, the particle surface and the particle volume, an automated laser scanner (3D Particleview, Fagus-GreCon Greten GmbH & Co. KG, Alfeld, Germany) with software version 1.0.0.0 was used. The resolution of the measuring device is 0.1 mm in length and width and 0.02 mm in thickness. The chosen measurement mask was “min. area 1 mm²”, the conveyer belt speed was set to 10 m/min, and the first vibratory feeder was set to 16% and the second vibratory feeder to 45% of the maximum available vibration rate.

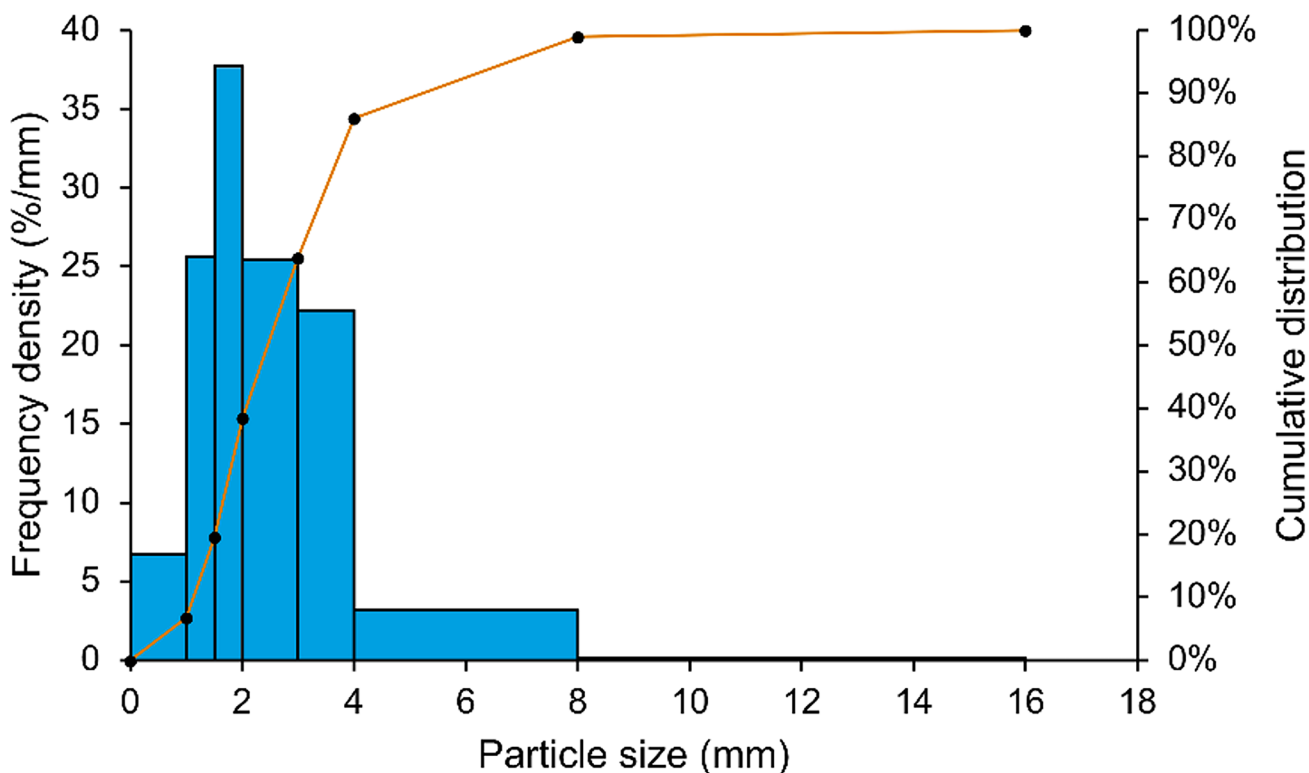


Fig. 1 Histogram showing the frequency density and cumulative distribution of particle sizes in the reference material

The reference particles (Reference) as well as all sieve fractions were measured by using triple determination. Each run weighed approximately 5 g for the finest sieve fraction (1–1.5 mm). To ensure that a similar number of particles was measured for the Reference and the different sieve fractions, weights of 15 g (Reference), 13 g (1.5–2 mm), 40 g (2–3 mm), 50 g (3–4 mm) were selected.

Particle length, width, thickness, surface and volume were determined. The particle thickness here is the average thickness based on all height measurements taken for each particle. Moreover, slenderness ratio (length divided by thickness), width ratio (length divided by width) and flatness (width divided by thickness) were calculated for each individual particle.

2.3 Adhesive calculation

According to Fig. 2, for the determination of the SSAA at uniform AC and the determination of the AC at uniform SSAA, respectively, two equations were applied. The equations are given below. Details on the application of the equations and the experimental design are given in Chap. 2.7.

The specific amount of adhesive on the particle surface depends on the total amount of adhesive available and the surface area of the particle. Therefore, the SSAA was calculated on the basis of the AC (mass of solid adhesive in relation to dry particle mass) and the surface area per mass (dry particles) derived from the particle measurements, following Eq. (1),

$$SSAA = AC[\%] / (100 \times \text{surface area per mass}), \quad (1)$$

while the surface area per mass was calculated as the quotient of surface area and dry particle mass.

In some cases, to achieve a certain SSAA at varying particle size, the therefor required AC was calculated on the basis of the SSAA and the surface area per mass (dry particles) derived from the particle measurements, in accordance with Eq. (2):

$$AC [\%] = SSAA \times \text{surface area per mass} \times 100. \quad (2)$$

2.4 Particleboard manufacturing

Single-layer particleboards were produced using a computer-controlled laboratory hot press (Siempelkamp Typ 2, G. Siempelkamp GmbH & Co. KG, Krefeld, Germany). The target density of the boards at 20 °C and 65% relative humidity (RH) was 650 kg/m³. The target board thickness was 15 mm. The target MC of the particle mat (mass of water in relation to dry mass of particle mat) was 7%. Details on the AC and SSAA for the different board types are given in Table 1. Before adhesive application, 6% hardener (mass of solid content in relation to mass of solid adhesive) was added to the adhesive solution. Gluing of the particles was conducted by using a portable concrete mixer (Atika Maschinenfabrik Wilhelm Pollmeier GmbH & Co., Ahlen, Germany) with a drum diameter of 600 mm. The adhesive was applied through a nozzle (Schlick Mod. 940/5 0.8 mm W38558, Düsen-Schlick GmbH, Untersiemau/Coburg, Germany) with an orifice of 1.8 mm using a laboratory pump with a three roller pump head (Watson-Marlow 323, Watson-Marlow GmbH, Rommerskirchen, Germany). The glue was applied by using a pressure of approximately 0.5 MPa onto the falling stream of particles at the center of the rotating drum. The amount of additional water was calculated with regard to particle MC and added with an atomizer before applying the adhesive to the particles in the rotating drum. The particle MC was unified in this manner, rather

	Equation 1		Equation 2
Input Parameters	Adhesive Content (AC)	Specific Surface Area of Particle Material	Surface-specific Adhesive Amount (SSAA)
Target Value	Surface-specific Adhesive Amount (SSAA)		Adhesive Content (AC)

Fig. 2 Overview of the equations applied for the determination of the SSAA at uniform AC respectively the determination of the AC at uniform SSAA

Table 1 Details on the different board types produced

Board Type	Particle Material	AC (%)	SSAA (g/m ²)
BT 1	Reference	8	13.2
BT 2	1–1.5 mm	12.5	13.2
BT 3	1.5–2 mm	9.7	13.2
BT 4	2–3 mm	7	13.2
BT 5	3–4 mm	6	13.2
BT 6	1–1.5 mm	8	8.5
BT 7	1.5–2 mm	8	10.9
BT 8	2–3 mm	8	15.2
BT 9	3–4 mm	8	17.6
BT 10	Reference	5.1	8.5
BT 11	Reference	6.6	10.9
BT 12	Reference	9.2	15.2
BT 13	Reference	10.6	17.6

BT board type, AC adhesive content, SSAA surface-specific adhesive amount

than by adding water to the adhesive beforehand, ensuring a uniform viscosity during all tests. Moreover, the desired density was achieved despite the mat's lateral deflection during the pressing process by scattering the particle mat in excess.

The particles were weighed and scattered in a forming mold of (600 × 500) mm positioned on an aluminum caul plate covered with siliconized paper to prevent adherence between board and caul plates. The finished scattered particle mat was pre-compacted before the forming mold was removed. After removing the forming mold, the particle mat was covered with a second siliconized paper and transferred to the laboratory hot press.

In order to obtain particleboards with a uniform density profile, the method described by Engehausen et al. (2024) was employed. The cold particle mat was compacted to a thickness of 15 mm with a closing time of 30 s allowing to reach the maximum piston pressure of 23 MPa in the hot press. During the following 60 min, the distance was kept constant at a pressure limited to 12 MPa, while the press temperature was steadily increased to 120 °C. After hot pressing, the boards were cooled at ambient conditions, edge-trimmed to (520 × 425) mm and then stored in a climate chamber at 20 °C and 65% RH before sample cutting.

2.5 Test specimen preparation

According to the cutting plan shown in Fig. 3, for BT 1 to BT 13 (each produced in triplicate),

- Seven test specimens were cut to (350 × 50) mm for the determination of MOR and MOE;
- 21 Test specimens were cut to (50 × 50) mm, of which six were randomly chosen for the determination of IB and seven for TS and WA.

Prior to testing, the test specimens were stored in a climate chamber at 20 °C and 65% RH until a constant mass was achieved.

2.6 Determination of board properties

Board density was determined according to DIN EN 323:1993-08. MOR and MOE were determined according to DIN EN 310:1993-08. IB was determined according to DIN EN 319:1993-08. TS after 2 and 24 h of immersion in water was determined according to DIN EN 317:1993-08. Additionally, the corresponding WA in percent was calculated.

2.7 Experimental design

For BT 1, the SSAA calculation was based on the surface area of the Reference with an AC of 8%, according to Eq. (1). The ACs for BT 2–5, were calculated by using the SSAA of BT 1, in combination with the surface areas of the different sieve fractions, in accordance with Eq. (2). Since, for these board types the SSAA was kept constant, they were planned to investigate the influence of the particle size on board properties. This was intended to be done by correlating mean values of the board properties with the particle size and testing for significance by mean value comparisons.

For BT 6–9, the SSAA calculation was based on the surface areas of the different sieve fractions and an AC of 8%, according to Eq. (1). For BT 10–13, the ACs were calculated by using the SSAAs of BT 6–9, along with the surface area of the unsieved material (Reference), according to Eq. (2). Since, for these board types (BT 10–13) and BT 1 the particle size was the same, they were used to investigate the influence of the SSAA on board properties. This was done analogously to the beforehand described procedure.

As before from the consideration of BT 2–5, the influence of the particle material was derived from the pairwise comparison of BT 6 and BT 10 (8.5 g/m²), BT 7 and BT 11 (10.9 g/m²), BT 8 and BT 12 (15.2 g/m²) as well as BT 9 and BT 13 (17.6 g/m²), since here the SSAA was the same.

As before from the consideration of BT 10–13 and BT 1, the influence of the SSAA was derived from the pairwise comparison of BT 2 and BT 6 (1–1.5 mm), BT 3 and BT 7 (1.5–2 mm), BT 4 and BT 8 (2–3 mm), and BT 5 and BT 9 (3–4 mm), since here the particle size was the same.

2.8 Statistical analysis

Statistical analysis and graphical representation of the experiments were carried out by applying the JMP 16 analysis tool (SAS, Cary, NC, USA) and Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corporation, Redmond, DC, USA), respectively.

R	TS/ WA	IB	MOR/MOE		
IB	R	MOR/MOE			TS/ WA
TS/ WA	MOR/MOE			IB	R
MOR/MOE			TS/ WA	IB	R
R	TS/ WA	IB	MOR/MOE		
R	IB	MOR/MOE			TS/ WA
TS/ WA	MOR/MOE			R	R

Fig. 3 Cutting plan applied for BT 1 to BT 13. *R* residual, *TS* thickness swelling, *WA* water absorption, *IB* internal bond strength, *MOR* modulus of rupture, *MOE* modulus of elasticity

Each dataset, except those of the three-dimensional particle measurement, was checked for extreme outliers by applying the interquartile range (IQR) method, with the IQR being 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 ($Q_1 - 3 \text{ IQR}$) was used; as the upper criterion for the definition as an extreme outlier, the third quartile plus the triple IQR ($Q_3 + 3 \text{ IQR}$) was used. In the case of a detected extreme outlier, it was considered to exclude all data available for this test specimen from the evaluation.

To assess a relationship between particle size and board properties, they were correlated for board types with varying particle size but constant SSAA. Conversely, to evaluate a relationship between SSAA and board properties, they were correlated for board types with varying SSAA but constant particle size.

The selection of appropriate tests for statistical data analysis, especially for mean value comparisons, was carried out according to a statistical decision path given by Benthien et al. (2020). All statistical tests were carried out at a significance level of $\alpha = 0.05$.

Between excluding extreme outliers and conducting further statistical evaluation, the values for the mechanical and sorption board properties were adjusted to match the target density. This was achieved by calculating a linear regression between specimen density and property, which was then applied to each board type to bring the corresponding property to the level matching the boards' target density (Eq. (3)).

$$\text{Adjusted property} = ((\text{Target density} - \text{Achieved density}) \times \text{Slope}) + \text{Property} \tag{3}$$

Table 2 Results of the three-dimensional particle measurement

Particle Material	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Specific Surface Area (mm ² /g)
Reference	4.1 (± 76%)	1.3 (± 63%)	0.38 (± 75%)	6,043
1–1.5 mm	3.4 (± 54%)	1.1 (± 40%)	0.29 (± 51%)	9,424
1.5–2 mm	4.5 (± 53%)	1.6 (± 34%)	0.47 (± 43%)	7,340
2–3 mm	5.8 (± 55%)	2.3 (± 32%)	0.71 (± 39%)	5,276
3–4 mm	6.3 (± 72%)	1.9 (± 72%)	0.56 (± 77%)	4,558

Mean values (± coefficient of variance) for particle dimensions and the specific surface area of each particle material

3 Results and discussion

3.1 Three-dimensional particle measurement

The results of the three-dimensional particle measurement are given in Table 2. In addition to the particle dimensions the specific surface area for each particle material is shown. With the exception of fraction 3–4 mm, the particle length, width and thickness increase over the particle materials from fine to coarse. Considering fraction 1–1.5 mm, 1.5–2 mm and 2–3 mm, particle length increases by 72%, particle width by 108% and particle thickness by 142%, each from 1 to 1.5 mm to 2–3 mm. The specific surface area decreases from fine to coarse fractions.

The separation of the initial particle material (core layer particles from industrial production) into fractions was conducted by a tumbler screener with a tower of stacked sieves. This mechanical process comprises a series of horizontally rotating sieves with decreasing mesh size through which the particles must successively pass. On each mesh, the particles are either sufficiently short to pass through the mesh directly or, over time, tend to tilt longitudinally through the mesh if their individual combination of width and thickness enables to pass the mesh. That the particles primarily pass longitudinally is evident from the results of length measurement on the one hand and the width measurement on the other hand. While the particle length of each fraction is much greater than the mesh size, the particle width – except for the fraction 3–4 mm – is in the range of the last to be passed and the not passable sieve. This proves that the particle width is the decisive factor for passage. Based on the mean width of fraction 3–4 mm it can be seen, that the 3 mm sieve was unintentionally loaded with an excess of material. This may have resulted in the accumulation of material on the mesh, which subsequently entered the initial fraction without undergoing the intended screening process. This is also supported by the fact, that the mean particle thickness, as likewise the width, decreases from fraction 2–3 mm to fraction 3–4 mm. The described observations led to the exclusion of fraction 3–4 mm from the investigation of the

Table 3 Results of the three-dimensional particle measurement

Particle Material	Slenderness Ratio	Width Ratio	Flatness
Reference	12.9 (± 64%)	3.3 (± 60%)	4.1 (± 43%)
1–1.5 mm	13.8 (± 65%)	3.4 (± 59%)	4.3 (± 42%)
1.5–2 mm	11.4 (± 68%)	3.1 (± 64%)	3.9 (± 47%)
2–3 mm	9.2 (± 64%)	2.7 (± 65%)	3.7 (± 50%)
3–4 mm	13.7 (± 64%)	3.8 (± 62%)	3.9 (± 48%)

Mean values (± coefficient of variance) for the form factors: slenderness ratio, width ratio and flatness of each particle material

influence of the particle size on board properties, since it obviously contains fine particles that should have passed the 3 mm sieve, and thus does not fit in the desired step by step increase in particle size over the fractions.

A reduction in the specific surface area of particles from fine to coarse sizes results in a shift in the SSAA, when the adhesive is applied at a constant mass-specific rate. This shows, that it is essential to consider this coherence when investigating the influence of particle geometry on board properties, given that the SSAA is also known to exert a significant influence (Engehausen et al. 2024).

Table 3 presents the calculated form factors, slenderness ratio (length divided by thickness), width ratio (length divided by width), and flatness (width divided by thickness) for each particle material. In the fractions 1–1.5 mm, 1.5–2 mm and 2–3 mm, a decrease in all form factors is observed with increasing particle size. The slenderness ratio here decreases by 33%, width ratio by 18%, and flatness by 14%, each from 1 to 1.5 mm to 2–3 mm. In accordance with the aforementioned contemplation of the particle dimensions, this trend is not evident in the calculated form factors for the fraction 3–4 mm. As the fraction 3–4 mm does not meet the desired criteria for investigating the influence of particle size on board properties, it is excluded from further discussion.

The change in form factors over the fractions indicates that the dimensional variation of the particles is not proportional for the major axes. In other words, the shape of the particles differs over the particle materials.

Since, for the considered fractions (1–1.5 mm, 1.5–2 mm and 2–3 mm), the particle length increases by 72% and the particle thickness increases by 142%, the decrease in slenderness ratio is due to the decrease in thickness. For the beforenamed fractions the decrease in width ratio is mainly induced by the decrease in width (108%), which exceeds the increase in particle length (72%). Further, the decrease in flatness is predominantly induced by the increase in particle thickness (142%), which exceeds the increase in particle width (108%). Overall, the particles increase in size, while the increase in width and thickness exceeds the increase in length.

Table 4 Mechanical properties (density compensated mean values (\pm coefficient of variance)) of the different board types with a nominal density of 650 kg/m^3

Board Type	Particle Material	Density Compensated Mean Value				
		AC (%)	SSAA (g/m^2)	MOR (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	IB (N/mm^2)
BT 1	Reference	8	13.2	8.4 ($\pm 5\%$)	1,608 ($\pm 4\%$)	0.61 ($\pm 4\%$)
BT 2	1–1.5 mm	12.5	13.2	11.4 ($\pm 8\%$)	1,748 ($\pm 2\%$)	1.29 ($\pm 12\%$)
BT 3	1.5–2 mm	9.7	13.2	9.1 ($\pm 3\%$)	1,672 ($\pm 2\%$)	0.79 ($\pm 3\%$)
BT 4	2–3 mm	7	13.2	7.5 ($\pm 7\%$)	1,387 ($\pm 2\%$)	0.68 ($\pm 3\%$)
BT 5	3–4 mm	6	13.2	8.0 ($\pm 4\%$)	1,442 ($\pm 5\%$)	0.51 ($\pm 4\%$)
BT 6	1–1.5 mm	8	8.5	8.8 ($\pm 4\%$)	1,569 ($\pm 2\%$)	0.76 ($\pm 2\%$)
BT 7	1.5–2 mm	8	10.9	8.2 ($\pm 4\%$)	1,544 ($\pm 3\%$)	0.72 ($\pm 3\%$)
BT 8	2–3 mm	8	15.2	8.8 ($\pm 6\%$)	1,706 ($\pm 3\%$)	0.65 ($\pm 3\%$)
BT 9	3–4 mm	8	17.6	7.0 ($\pm 11\%$)	1,374 ($\pm 12\%$)	0.47 ($\pm 20\%$)
BT 10	Reference	5.1	8.5	8.3 ($\pm 7\%$)	1,444 ($\pm 3\%$)	0.57 ($\pm 3\%$)
BT 11	Reference	6.6	10.9	9.1 ($\pm 6\%$)	1,544 ($\pm 3\%$)	0.69 ($\pm 4\%$)
BT 12	Reference	9.2	15.2	10.0 ($\pm 6\%$)	1,728 ($\pm 2\%$)	0.87 ($\pm 4\%$)
BT 13	Reference	10.6	17.6	10.5 ($\pm 5\%$)	1,837 ($\pm 3\%$)	0.91 ($\pm 4\%$)

BT board type, AC adhesive content, SSAA surface-specific adhesive amount, MOR modulus of rupture, MOE modulus of elasticity, IB internal bond strength

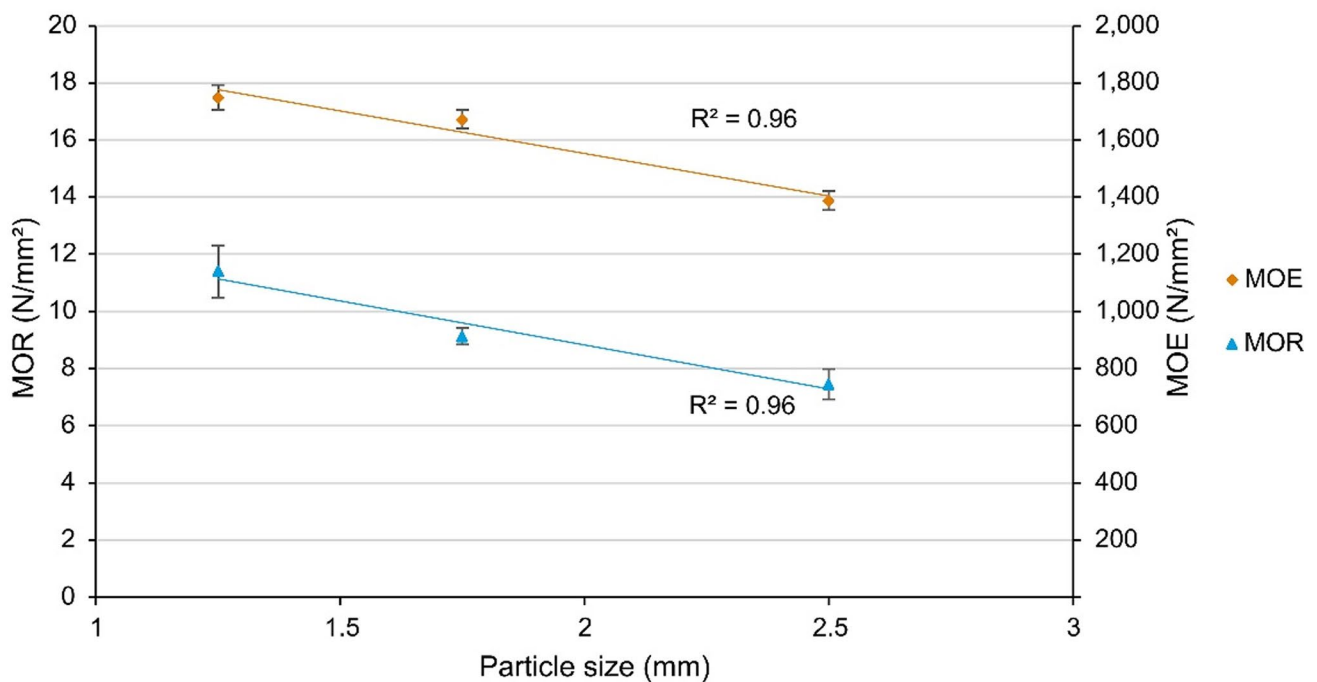


Fig. 4 Correlation between particle size and bending properties. Shown are the density compensated mean values and standard deviations for board types (BT 2–4) of different particle size but constant

surface-specific adhesive amount. (MOR = modulus of rupture, MOE = modulus of elasticity, R^2 = coefficient of determination)

3.2 Mechanical properties

An overview of the results of the determination of the mechanical properties of all board types (BT 1–13) is given in Table 4. Depending on the particle size and the SSAA, differences in bending properties and IB can be seen. The results of the investigation on the influence of particle size and SSAA on mechanical properties are presented and discussed in the following two subchapters.

3.2.1 Influence of particle size on mechanical properties

The correlation between particle size and MOR respectively MOE is given in Fig. 4. As explained in Chap. 3.1., only mean values and standard deviations for BT 2–4 made from fractions 1–1.5 mm, 1.5–2 mm and 2–3 mm are considered. For each fraction, the particle size, defined as the mean value of the finer and coarser sieve mesh size (here 1.25, 1.75 and 2.5 mm), is plotted on the x-axis. Both MOR and

MOE decrease statistically significant with increasing particle size when keeping the SSAA constant at 13.2 g/m^2 . For the correlation of particle size and MOR respectively MOE the coefficients of determination both amount to 0.96.

Analogous to Figs. 4, 5 shows the correlation between particle size and IB. At constant SSAA of 13.2 g/m^2 , the IB decreases statistically significant with increasing particle size. The corresponding coefficient of determination amounts to 0.81.

The results of the influence of particle size on mechanical properties are, at least at first impression, in contrast to the interpretation in existing studies. For example, Istek et al. (2018) produced 3-layered boards and found an increase in MOR with increasing particle size in face or core layer. The IB increased with increasing particle size in the core layer. Rahman et al. (2019) also found an increase in MOR and MOE with increasing particle size. Röllig et al. (2024) came to similar results and found an increase in MOR, MOE and IB with increasing particle size. However, all these studies have in common, that the adhesive was applied on a mass-specific basis and the SSAA was not taken into account. Their experimental design implies that the SSAA was, probably unintentionally, increased with increasing particle size or decreasing specific surface area. In other words, the increase in bending properties and IB is, at least partly, due to the increase in SSAA with increasing particle size.

In the present study a statistically significant decrease in MOR, MOE and IB was found with increasing particle

size while keeping the SSAA constant. This coincides with investigations by Kitahara and Kasagi (1955) who also kept the SSAA constant and found a decrease of MOR and MOE with increasing particle size. The decrease in mechanical properties with increasing particle size could be explained by the assumption, that boards made from coarse particles tend to have larger cavities than boards made from fine particles, which could lead to stress peaks during loading and consequently to failure. Former investigations by Engehausen et al. (2024) on single-layer particleboards from coarse core layer particles and fine face layer particles also led to the conclusion that the IB decreases with increasing particle size. Interestingly, and in contrast to the present study, MOR and MOE were found to increase with increasing particle size. This finding may be due to an underestimation of the specific surface area of the face layer particles. Although the face layer particles were pre-screened with a 1 mm sieve in order to remove the fines, it is likely that portions of very fine material and wood dust, which were not detected by the automated laser scanner, still adhered to the larger particles. Consequently, the actual SSAA for face layer particles was lower than that for core layer particles, and the resulting bending properties were higher for boards made from core layer particles compared to boards made from face layer particles.

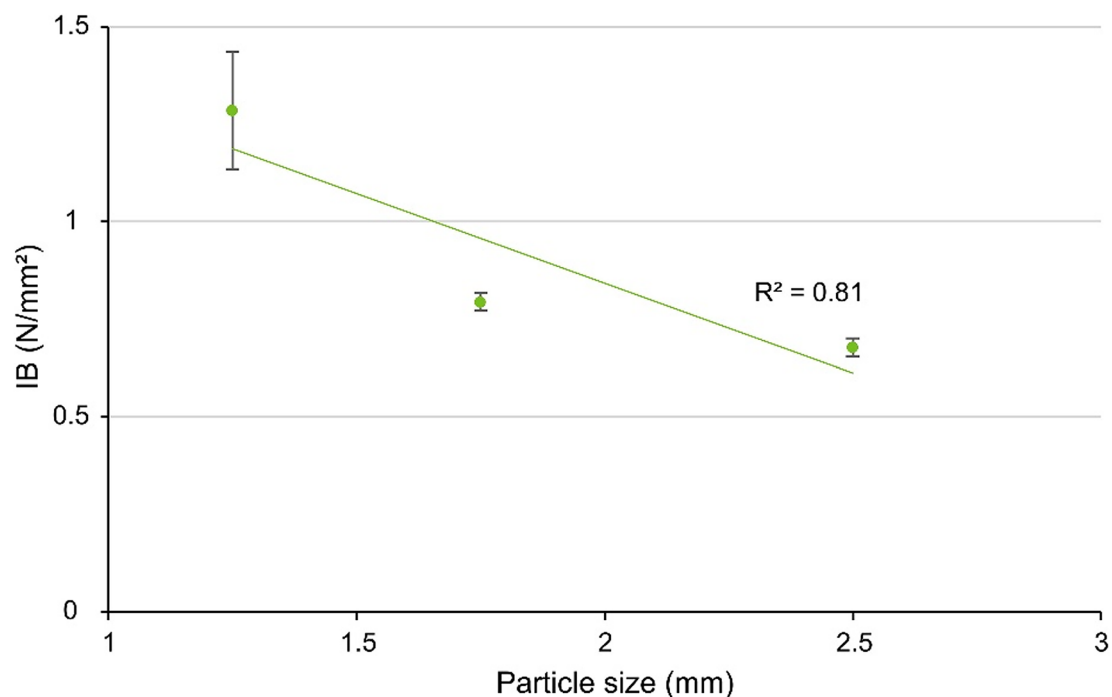


Fig. 5 Correlation between particle size and internal bond strength (IB). Shown are density compensated mean values and standard deviations for board types (BT 2–4) of different particle size but constant SSAA (surface-specific adhesive amount). (R^2 = coefficient of determination)

3.2.2 Influence of SSAA on mechanical properties

The correlation between SSAA and MOR, respectively MOE, is given in Fig. 6. Here, the mean values and standard deviations for board types made from the same particle material but different SSAA are considered. Both MOR and MOE increase statistically significant with increasing SSAA when keeping the particle size constant. For the correlation of SSAA with MOR and MOE, respectively, the coefficients of determination amount to 0.72 and 0.99.

Analogous to Figs. 6, 7 shows the correlation between SSAA and IB. For the considered board types with constant particle size, the IB increases statistically significant with increasing SSAA. The corresponding coefficient of determination amounts to 0.78. Looking at Table 4, the pairwise comparison of BT 2 and BT 6, BT 3 and BT 7, BT 4 and BT 8 is in accordance with the beforehand described results. Only the pairwise comparison of the IB of BT 4 and BT 8, as well as the pairwise comparisons of the MOR, MOE and IB of BT 5 and BT 9 are exceptions.

The results clearly show the statistically significant influence of the SSAA on the mechanical properties of particleboards and underline the problem of many existing investigations on the influence of particle size on board properties, where the SSAA was not kept constant. The more adhesive available to the particle surface the better their interconnection, which results in a statistically significant increase in mechanical properties. This effect comes

into play at various investigations such as those from Istek et al. (2018), Rahman et al. (2019), Benthien et al. (2019) Rollig et al. (2024), where, due to a mass-specific adhesive application, an increase in particle size or dimension (decrease in specific surface area) leads to an increase in SSAA and consequently an increase in mechanical board properties.

3.3 Sorption properties

An overview of the results of the determination of the sorption properties of all board types (BT 1–13) is given in Table 5. Depending on the particle material and the SSAA, differences in thickness swelling and water absorption can be seen. The results of the investigation on the influence of particle size and SSAA on sorption properties are presented and discussed in the following two subchapters.

3.3.1 Influence of particle size on sorption properties

The correlation between particle size and TS after 2 and 24 h respectively WA after 2 and 24 h is given in Fig. 8. As described in Chap. 3.1., only mean values and standard deviations for BT 2–4 are considered. Both TS and WA after 2 and 24 h increase statistically significant with increasing particle size when keeping the SSAA constant at 13.2 g/m². For the correlation of particle size and TS after 2 h, TS after 24 h, WA after 2 h and WA after 24 h the coefficients of

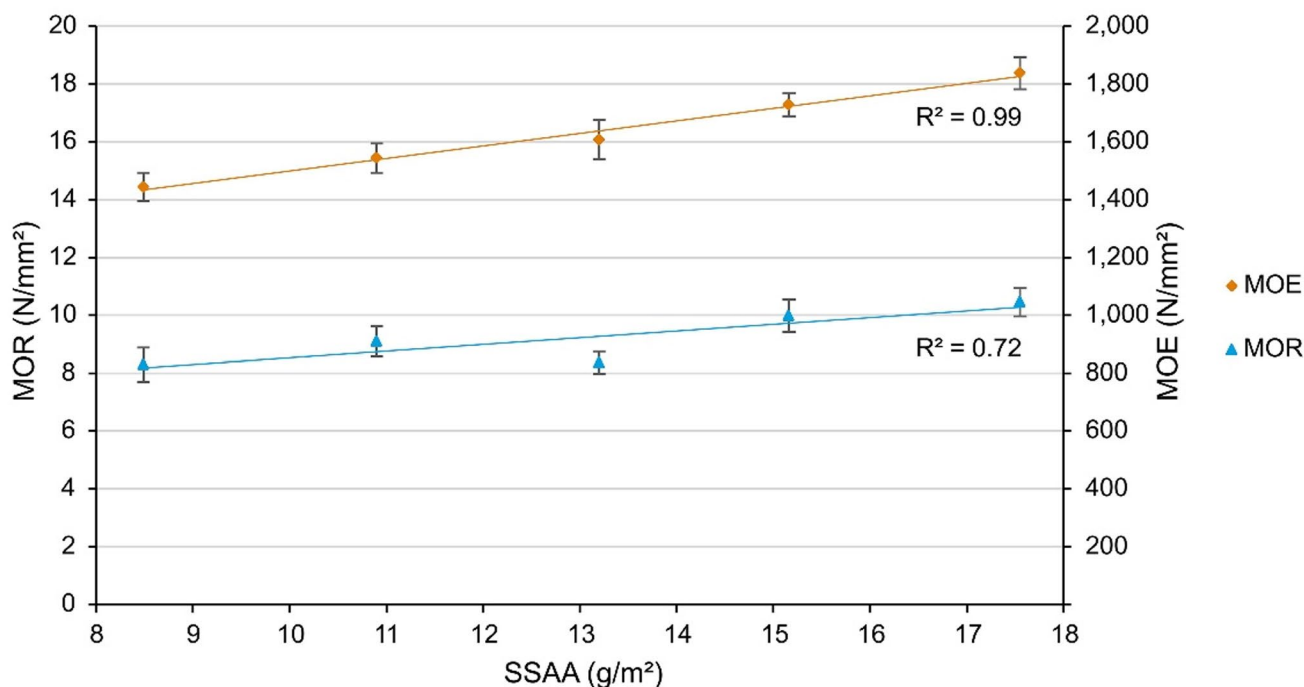


Fig. 6 Correlation between surface-specific adhesive amount (SSAA) and bending properties. Shown are density compensated mean values and standard deviation for board types (BT 1 and BT 10–13) of

different SSAA but constant particle size. *MOR* modulus of rupture, *MOE* modulus of elasticity, *R*² coefficient of determination

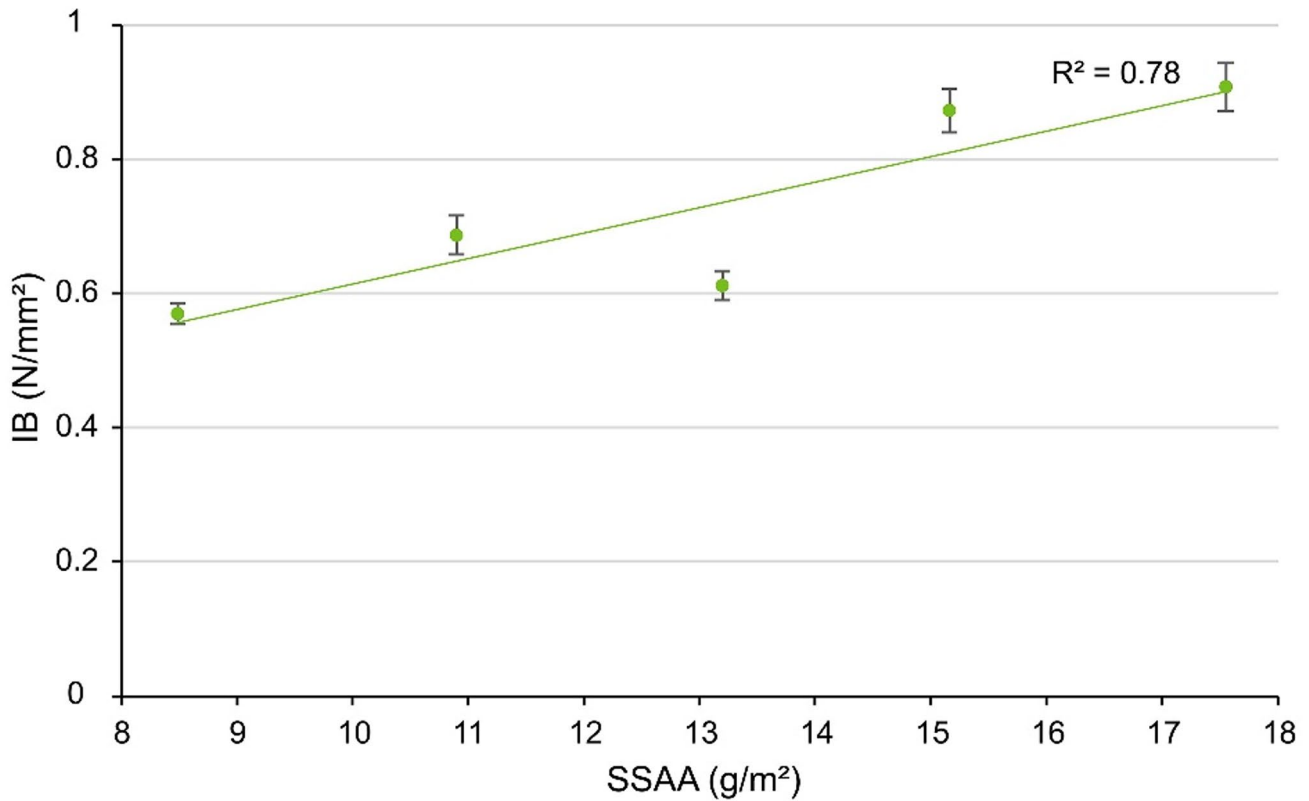


Fig. 7 Correlation between surface-specific adhesive amount (SSAA) and internal bond strength (IB). Shown are density compensated mean values and standard deviations for board types (BT 1 and BT 10–13) of different SSAA but constant particle size. R^2 coefficient of determination

Table 5 Sorption properties (density compensated mean values (\pm coefficient of variance)) of the different board types with a nominal density of 650 kg/m³

Board Type	Particle Material	Density Compensated Mean Value					
		AC (%)	SSAA (g/m ²)	TS (2 h) (%)	WA (2 h) (%)	TS (24 h) (%)	WA (24 h) (%)
BT 1	Reference	8	13.2	25.2 (\pm 6%)	81.4 (\pm 1%)	30.3 (\pm 7%)	92.7 (\pm 2%)
BT 2	1–1.5 mm	12.5	13.2	9.5 (\pm 38%)	62.5 (\pm 11%)	12.8 (\pm 27%)	75.3 (\pm 7%)
BT 3	1.5–2 mm	9.7	13.2	21.4 (\pm 4%)	77.8 (\pm 4%)	25.6 (\pm 4%)	86.2 (\pm 2%)
BT 4	2–3 mm	7	13.2	24.0 (\pm 5%)	80.2 (\pm 4%)	29.8 (\pm 4%)	89.9 (\pm 3%)
BT 5	3–4 mm	6	13.2	33.8 (\pm 8%)	83.2 (\pm 4%)	40.5 (\pm 7%)	94.0 (\pm 3%)
BT 6	1–1.5 mm	8	8.5	22.5 (\pm 3%)	90.9 (\pm 2%)	26.6 (\pm 3%)	98.7 (\pm 2%)
BT 7	1.5–2 mm	8	10.9	24.9 (\pm 4%)	86.0 (\pm 4%)	29.0 (\pm 3%)	95.3 (\pm 2%)
BT 8	2–3 mm	8	15.2	29.2 (\pm 5%)	85.1 (\pm 4%)	33.9 (\pm 5%)	92.2 (\pm 1%)
BT 9	3–4 mm	8	17.6	30.1 (\pm 11%)	75.6 (\pm 4%)	36.1 (\pm 10%)	88.4 (\pm 4%)
BT 10	Reference	5.1	8.5	25.7 (\pm 6%)	86.5 (\pm 4%)	29.0 (\pm 5%)	92.3 (\pm 2%)
BT 11	Reference	6.6	10.9	18.4 (\pm 6%)	74.6 (\pm 3%)	21.9 (\pm 7%)	84.2 (\pm 2%)
BT 12	Reference	9.2	15.2	12.5 (\pm 9%)	61.1 (\pm 5%)	16.7 (\pm 7%)	73.1 (\pm 2%)
BT 13	Reference	10.6	17.6	12.0 (\pm 7%)	65.5 (\pm 4%)	14.4 (\pm 5%)	74.5 (\pm 2%)

BT board type, AC adhesive content, SSAA surface-specific adhesive amount, TS thickness swelling, WA water absorption

determination amount to 0.8, 0.85, 0.76 and 0.85. Further, it can be seen, that for each individual board type, TS and WA increase with the time of exposure to water.

The results for the influence of particle size on TS and WA are in accordance with results of most existing investigations such as that from Kitahara and Kasagi (1955). An explanation for the increase in TS and WA with increasing

particle size could be, that boards made from coarser particles tend to have larger cavities that mitigate the interparticle bond (higher TS) and can take up more water (higher WA), compared to boards made from fine particles.

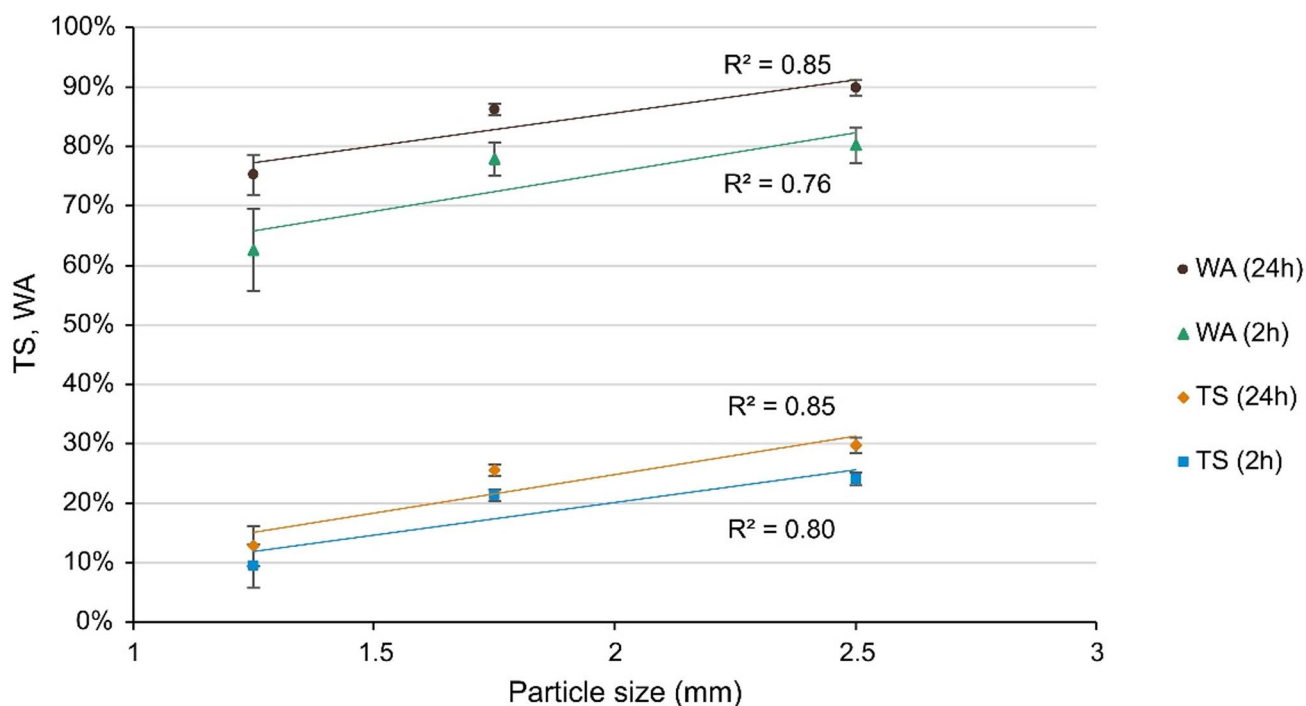


Fig. 8 Correlation between particle size and thickness swelling (TS) respectively water absorption (WA) after 2 and 24 h. Shown are density compensated mean values and standard deviations for board types

(BT 2–4) of different particle size but constant SSAA (surface-specific adhesive amount). R^2 coefficient of determination

3.3.2 Influence of SSAA on sorption properties

The correlation between SSAA and TS after 2 and 24 h respectively WA after 2 and 24 h is given in Fig. 9. Here, the mean values and standard deviations for board types made from the same particle material but different SSAA are considered. Both TS and WA after 2 and 24 h decrease statistically significant with increasing SSAA when keeping the particle size constant. For the correlation of SSAA and TS after 2 h, TS after 24 h, WA after 2 h and WA after 24 h the coefficients of determination amount to 0.62, 0.57, 0.67 and 0.6. Further, it can be seen, that for each individual board type, TS and WA increase with the time of exposure to water. Looking at Table 5, the pairwise comparisons of BT 2 and BT 6, BT 3 and BT 7, BT 5 and BT 9 are in accordance with the results described above. Only the pairwise comparison of the sorption properties of BT 4 and BT 8 represents an exception.

The results are consistent with those of Rahman et al. (2019), who also found a decrease in TS and WA with increasing AC (which corresponds to an increase in SSAA). The more adhesive available to the particle surface the better their interconnection, which leads to lower TS and WA. The shown effect also comes into play at the investigations stated in Chap. 3.2.2., where, due to a mass-specific adhesive application, an increase in particle size or dimension

(decrease in specific surface area) leads to an increase in SSAA and consequently a decrease in sorption properties.

4 Conclusion

The following conclusions can be drawn from this research:

1. As particle size increases, the specific surface area (surface-to-volume ratio) decreases. Consequently, if the adhesive is applied on a mass-specific basis, the SSAA will increase with increasing particle size. In other words, at equal mass there are fewer but larger particles, which have a smaller surface area overall and therefore also have a higher relative adhesive coverage (SSAA). For an isolated investigation of the influence of particle size or in general geometry on board properties, the SSAA must be kept constant, as it also has a significant influence on the board properties.
2. Increasing particle size at constant SSAA results in a statistically significant decrease in MOR, MOE and IB and a statistically significant increase in TS and WA. The increase in particle size was accompanied by a decrease in the slenderness ratio (length divided by thickness), induced by a greater increase in particle thickness than in length. It can therefore be concluded that an increase in particle thickness has a negative

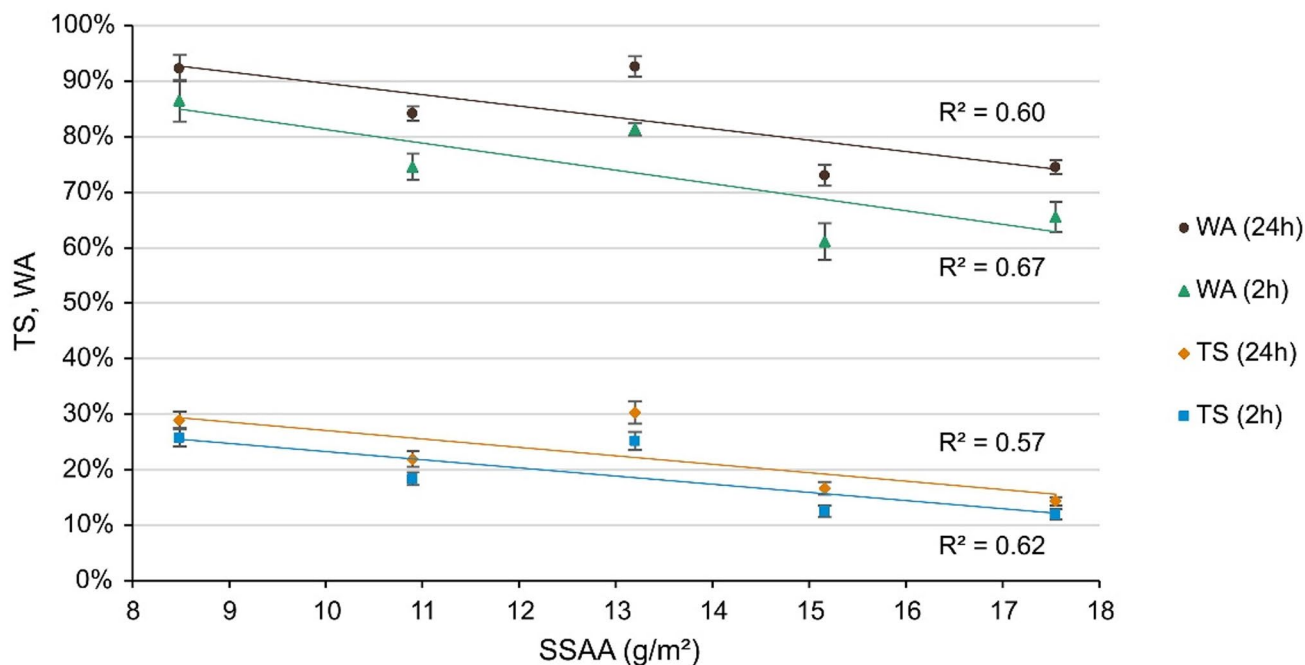


Fig. 9 Correlation between surface-specific adhesive amount (SSAA) and thickness swelling (TS) respectively water absorption (WA) after 2 and 24 h. Shown are density compensated mean values and standard

deviations for board types (BT 1 and BT 10–13) of different SSAA but constant particle size. R^2 coefficient of determination

effect on the mechanical properties of the boards and causes an increase in TS and WA, respectively.

- Increasing the SSAA at constant particle size results in a statistically significant increase in MOR, MOE and IB and a statistically significant decrease in TS and WA.

The decrease in mechanical properties with increasing particle size, may be attributed to the assumption, that boards made from coarse particles, compared to boards made from fine particles, tend to exhibit larger voids that could potentially result in concentrated peaks in stress during loading, ultimately leading to failure. The observed increase in TS and WA with increasing particle size is also corroborated by this theory, as larger cavities can weaken the interparticle bond (higher TS) and may absorb more water (higher WA).

The experimental setup and the findings of this study are based on a novel measurement technique that allows for the maintenance of a constant SSAA during testing, thereby contradicting the interpretation of previous studies and calling common basic assumptions into question. Further research, particularly to confirm the observed correlations and in conjunction with fine-structural analyses, is necessary to consolidate scientific knowledge on this matter and consistently improve the efficiency of raw material utilization in industrial production.

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02275-3>.

Author contributions Conceptualization, N.E. and J.T.B.; methodology, N.E. and J.T.B.; investigation, formal analysis N.E.; writing—original draft preparation, N.E.; writing—review and editing, N.E., J.T.B. and J.L.; project administration, J.L.; funding acquisition, N.E., J.T.B. and J.L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Data availability No datasets were generated or analysed during the current study.

Declarations

Conflict of interest The authors declare no competing interests.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Arabi M, Haftkhani AR, Pournaba R (2023) Investigating the effect of particle slenderness ratio on optimizing the mechanical properties of particleboard using the response surface method. *BioRes* 18(2):2800. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.2800-2814>
- Astari L, Prasetyo KW, Suryanegara L (2018) Properties of particle-board made from wood waste with various size. *IOP Conf Series: Earth Environ Sci* 166(1):12004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/166/1/012004>
- Benthien JT, Ohlmeyer M (2016) Zusammenhang von Spanqualität und Platteneigenschaften - Eine Untersuchung von Spänen verschiedener Hersteller [Relationship between particle quality and board properties-an investigation of particles from different manufacturers]. Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 38p, *Thünen Working Paper* 52. <https://doi.org/10.3220/WP1454667598000>
- 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. *Fibers* 8(7):46. <https://doi.org/10.3390/fib8070046>
- Benthien JT, Lütke J, Ohlmeyer M (2019) Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. *Eur J Wood Wood Prod* 77(6):1029–1043. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01452-5>
- Brumbaugh J (1959) Effect of flake dimensions on properties of particle boards. *Prod J* 10:243–246
- Dunky M, Niemz P (2002) Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren [Wood-based materials and adhesives: technology and influencing factors]. Springer, Heidelberg
- Engehausen N, Benthien JT, Lütke J (2024) Influence of particle size on the mechanical properties of single-layer particleboards. *Fibers* 12(4):32. <https://doi.org/10.3390/fib12040032>
- Farrokhpayam SR, Valadbeygi T, Sanei E (2016) Thin particleboard quality: effect of particle size on the properties of the panel. *J Indian Acad Wood Sci* 13:38–43. <https://doi.org/10.1007/s13196-016-0163-9>
- Haselein CR, Calegari L, Barros MV, Hack C, Hillig É, Pauleski DT, Pozzera F (2002) Mechanical strength and dimensional stability of particleboard made with different particle sizes. *Ciencia Florestal* 12:127–134. <https://doi.org/10.5902/198050981687>
- Istek A, Siradag H (2013) 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
- Istek A, Aydin U, Ozlusoylu 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 26–29
- Kasim J, Mat Yusof AA, Mohd Hashim NH, Salamat NA (2008) Effects of particle sizes, resin content and board density on properties of Sesendok particle board. *Jurnal Gading UiTM Pahang* 12(1):1–9
- Keylwerth R (1958) Zur Mechanik der mehrschichtigen Spanplatte [On the mechanics of multi-layer particleboard]. *Eur J Wood Wood Prod* 16(11):419–430. <https://doi.org/10.1007/BF02617779>
- Kimoto K, Ishimori E, Sasaki H, Maku T (1964) Studies on the particle boards: report 6: effects of resin content and particle dimension on the physical and mechanical properties of low-density particle boards. Report of the Institute of wood research. *Kyoto Univ* 32:1–14
- Kitahara K, Kasagi K (1955) Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chip-board. *Wood Ind* 10:406–412
- Lias H, Kasim J, Johari NAN, Mokhtar ILM (2014) Influence of board density and particle sizes on the homogenous particleboard properties from Kelempayan (*Neolamarckia cadamba*). *Int J Latest Res Sci Technol* 3(6):173–176
- Liiri O (1960) Investigations on particle preparation and the significance of particle properties in the manufacture of particle board I. *Pap Puu* 42:57–62
- Liiri O (1961) Investigations on properties of wood particle boards. *Pap Puu* 43:3–18
- Miyamoto K, Nakahara S, Suzuki S (2002) Effect of particle shape on linear expansion of particleboard. *J Wood Sci* 48:185–190. <https://doi.org/10.1007/BF00771365>
- Plath E (1963) Einfluss der rohdichte auf die eigenschaften von Holzwerkstoffen [Influence of density on the properties of wood-based materials]. *Eur J Wood Wood Prod* 21:104–108. <https://doi.org/10.1007/BF02609708>
- Post PW (1958) Effect of particle geometry and resin content on bending strength of oak flake board. *Prod J* 8:317–322
- Rackwitz G (1963) Der einfluß der spanabmessungen auf einige eigenschaften von Holzspanplatten [The influence of particle dimensions on some properties of particleboard]. *Eur J Wood Wood Prod* 21(6):200–209. <https://doi.org/10.1007/BF02609724>
- Röllig P, Tudor EM, Barbu MC, Direske M (2024) Effect of the particle geometry on lightweight particleboard from Paulownia using high-frequency pressing technology. *Wood Mater Sci Eng* 19(3):683–690. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2286625>
- Walter K, Kieser J, Wittke T (1979) Einfluß der spanform auf einige festigkeitseigenschaften orientiert gestreuter Spanplatten [Influence of particle shape on some strength properties of oriented particleboard]. *Holz Als Roh- Und Werkst* 37(5):183–188. <https://doi.org/10.1007/BF02626531>
- Wan Abd Rahman W, Md Yatim A, Mat Zlan A, Kasim J, Mohd Yunus N (2019) Effects of the resin content and particle size on the properties of particleboard made of *Neolamarckia* and *Leucaena* particles. *BioRes* 14(3):6079–6087. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6079-6087>
- Wong ED, Zhang M, Wang Q, Kawai S (1999) Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. *Wood Sci Technol* 33:327–340. <https://doi.org/10.1007/s002260050119>
- Yemele MCN, Blanchet P, Cloutier A, Koubaa A (2008) Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black Spruce and trembling Aspen bark. *Prod J* 58(11):48–56

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

Eingereichtes Manuskript

X-ray micro-computed tomographic investigation on the pore structure of particleboard and its effect on mechanical board properties in FEM simulation

Nick Engehausen^{1*}, Jan T. Benthien², Jan Lüdtk², Stefan Rief³, Matthias Kabel³, Andreas Krause², Linnea Hesse¹

¹ University of Hamburg, Institute of Wood Science, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg, Germany; nick.engehausen@studium.uni-hamburg.de, linnea.hesse@uni-hamburg.de (+49 40 73962-645),

² Thünen Institute of Wood Research, Leuschnerstraße 91, 21031, Hamburg Germany; jan.benthien@thuenen.de (+49 40 73962-652), jan.luedtke@thuenen.de (+49 531 2570-1494), andreas.krause@thuenen.de (+49 531 2570-1068)

³ Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics ITWM, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Germany; stefan.rief@itwm.fraunhofer.de (+49 631 31600-4558), matthias.kabel@itwm.fraunhofer.de (+49 631 31600-4649)

* Correspondence: nick.engehausen@studium.uni-hamburg.de

Abstract

X-ray micro-computed tomography (μ CT) was combined with finite element method (FEM) simulation to investigate the pore structure of particleboards and its influence on mechanical properties. The study was motivated by prior laboratory tests, which revealed a significant decrease in modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond strength (IB) with increasing particle size, in contrast to trends reported in the literature. For an in depth understanding of the influence of particle size and pore structure, non-mechanically loaded specimens of particleboards used for mechanical testing, were imaged via μ CT. The 3D image data was then analysed regarding the pore structure and processed into FEM models to simulate three-point bending load and tensile loads in all principal material directions as well as resulting stresses. The results indicate that particleboards manufactured from coarser particles exhibit higher overall porosity (ratio of pore volume to the total specimen volume) and larger interparticle pores. These structural features lead to localized stress concentrations in the solid matrix surrounding the interparticle pores (notches) particularly under tensile loading in the board plane. The observed microstructural characteristics are associated with statistically significant reductions in all simulated elastic moduli across the investigated load cases, consistent with the trends observed in experimental testing. The findings support the hypothesis, that increasing particle size, and the corresponding enlargement of interparticle pores or smaller interparticle contact surface, result in a reduced mechanical performance of particleboards.

Keywords

Particleboard, mechanical properties, pore structure, x-ray micro-computed tomography, FEM

1. Introduction

Mechanical properties of particleboards are governed by a range of material- and process-related parameters. Amongst these, particle geometry represents an important factor which has not yet been fully elucidated. Previous investigations by Engehausen et al. (2025) on single-layer particleboards with a homogeneous raw density profile and a uniform surface-specific adhesive amount (SSAA) demonstrated that mechanical properties decrease with increasing particle size. Specifically, increasing the particle size from 1–1.5 mm to 2–3 mm sieve fractions resulted in reduction of 21% in bending modulus of elasticity (MOE), 35% bending modulus of rupture (MOR), and 47% in internal bond strength (IB). Comparable results were reported by Kitahara and Kasagi (1955), who investigated the influence of particle size on board properties while keeping the SSAA constant. Their study also showed a decrease in bending MOE and bending MOR with increasing particle size. At first glance, the results of Engehausen et al. (2025) and Kitahara and Kasagi (1955) appear to contradict the majority of existing studies, which report an opposite trend. However, a closer examination indicates that the experimental designs of many previous studies do not permit an isolated assessment of particle effects. In particular, mass-specific adhesive application was commonly employed, resulting in different adhesive amounts being applied to particle fractions with varying surface areas (Brumbaugh 1959, Liiri 1960, Istek et al. 2018, Benthien et al. 2019, Rahman et al. 2019, Röllig et al. 2024). More precisely, when mass-specific adhesive application is used, fine particles with a high specific surface area receive a lower SSAA than coarse particles with a lower specific surface area. As demonstrated in previous investigations by Engehausen et al. (2024, 2025) the SSAA has a significant influence on interparticle bonding and, consequently, on the mechanical properties of particleboards. Therefore, in the studies cited above, the intrinsic effect of particle size is confounded by variations in adhesive amount, resulting in a superposition of particle size and bonding effects.

Consequently, the micro- and macrostructure of particleboards made of particles with varying size must be examined in more detail in order to gain an in depth understanding of the influence of particle size on the mechanical properties of particleboard. Porosity (ratio of pore volume to total specimen volume), and in particular the size and spatial distribution of pores between adjacent particles, represent key factors governing board performance. This is especially relevant because porosity and pore structure directly affect the characteristics of particle overlap and contact areas and, thus, the effectiveness of interparticle bonding.

However, it must be considered that wood is inherently a hierarchically organized porous material. Wood porosity has been examined in numerous studies (Schneider & Wagner 1974, Schneider 1979, Kollmann 1987, Junghans et al. 2005, Sperry et al. 2006, Wagenführ & Wagenführ 2021, Pfriem 2009, Plötze & Niemz 2011). To clearly distinguish anatomical pores from interparticle pores, the characteristic size range of anatomical voids must be taken into account. This differentiation is essential for a reliable evaluation of the influence of particle size on mechanical properties. The most relevant pores are the cell lumina of conductive tissues. According to Sperry et al. (2006), the tracheid lumen diameters range from 10 to 65 μm , whereas vessel diameters range from 17 to 500 μm . On this basis, pores within this size range, which are likely to correspond to anatomical porosity, were excluded from the present analysis.

Previous studies on the porosity of wood-based materials have demonstrated considerable variety depending on material composition. Ferro et al. (2021) used mercury intrusion porosimetry to determine porosities ranging from 28 to 55% for five Oriented strand boards (OSB) with varying wood type, adhesive content and board density. Similarly, Chaydarreh et al. (2022) used mercury porosimetry to investigate the effect of particle size and mixing ratio on the porosity of single-layer particleboards made of tea oil camelia shells and eucalyptus wood (*Eucalyptus grandis* x *urophylla*).

Their results indicated that fine particles generally reduce porosity, whereas coarse particles increase it. For particleboards composed solely of wood particles, however, the differences were minimal, with porosities of 48% for boards made from coarse particles and 47% for boards made from fine particles.

When analysing porosity in the context of particle size effects on mechanical properties, only the pores between adjacent particles should be considered. Based on results of Engehausen et al. (2024, 2025), a hypothesis was formulated to explain the observed decrease in mechanical performance with increasing particle size. Specifically, particleboards made of coarse particles are expected to contain a greater number of larger interparticle pores compared to boards made from fine particles. These larger pores reduce the interparticle contact area, leading to localized stress concentrations under load and, ultimately, to failure. This hypothesis is further supported by Huang et al. (2021) who demonstrated for porous materials that irregular or disordered pore distributions induce localized stress concentrations, promoting crack initiation and propagation, and consequently reduce fracture resistance.

The aim of this study was to test the hypothesis that increasing particle size leads to larger interparticle pores, reduced interparticle contact, and localized stress concentrations, ultimately decreasing mechanical performance. For this, micro-computed tomography (μ CT) was applied to specimens taken from laboratory particleboards previously used to assess the decrease in bending modulus of elasticity, bending modulus of rupture, and internal bond strength with increasing particle size (Engehausen et al. 2025). The resulting 3D image data were processed using image analysis to generate binary images differentiating solid material from air and to quantify and compare pore structure of boards made from different particle sizes. The μ CT scans were subsequently incorporated into finite element method (FEM) models, and simulations of tensile loading in all principal material directions, as well as 3-point bending, were conducted to evaluate stress distributions and simulated elastic moduli across the different board types. This approach allows a qualitative comparison of the investigated board types and provides a comprehensive understanding of the relationships among particle size, pore structure, and mechanical performance in particleboards.

2. Materials and methods

2.1. Sample material

Sample material was taken from particleboards used in a previously published study by Engehausen et al. (2025), in which 13 different single-layer board types with homogenous density profile were manufactured. The boards were produced using sieve fractions of industrial core layer particle material. For the present investigation only three of the board types were considered, all having a uniform SSAA of 13.2 g/m² but differing in particle size: 1–1.5 mm (Board Type 2, BT2), 1.5–2 mm (BT3) and 2–3 mm (BT4). The applied adhesive was a urea formaldehyde (UF) adhesive (Silekol 124; Silekol Sp. z o.o., Kędzierzyn – Koźle, Poland) with a solids content of 66%. Ammonium nitrate (Fisher Scientific GmbH, Schwerte, Germany) was dissolved to prepare a 40% solid content solution, which was used as hardener. Further details on the calculation of the (mass specific) adhesive content (AC) and the SSAA as well as on the manufacturing process of the boards, are provided in the aforementioned publication (Engehausen et al. 2025).

2.2. Preparation and selection of test specimens

Several cubic test specimens (15 mm × 15 mm × board thickness) were cut from the edges of samples prepared from boards of BT2, BT3 and BT4 that were used in bending experiments by Engehausen et al. (2025). This approach was validated by preliminary tests in which an entire bending specimen

was sectioned into internal bond specimens and subsequently tested. Since no significant variation in IB was observed, it was concluded that shear loading during the prior bending test had no measurable effect on the core layer integrity.

To ensure uniform density across the test specimens, bending samples from the inner region of the board were used. Prior to further examination, the specimens were conditioned in a climate chamber at 20 °C and 65% relative humidity (RH) until constant mass was achieved. The density of all test specimens was determined gravimetrically in accordance with DIN EN 323:1993-08. Three test specimens per board type with a density of 630 kg/m³ ±5% were selected and are summarized in Table 1.

Table 1 Details of test specimens by board type (BT). Listed are particle size, adhesive content (AC), surface-specific adhesive amount (SSAA), and density.

	Specimen	Particle Size (mm)	AC	SSAA (g/m ²)	Density (kg/m ³)
BT2	1.1				649
	1.2	1–1.5	12.5%	13.2	629
	1.3				620
BT3	2.1				620
	2.2	1.5–2	9.7%	13.2	634
	2.3				619
BT4	3.1				643
	3.2	2–3	7.0%	13.2	604
	3.3				614

2.3. μ CT scans

μ CT scans were acquired using an X-ray micro-computed tomography system (CT-ALPHA 190, ProCon X-ray GmbH, Sarstedt, Germany), equipped with an XWT-190-THE PLUS X-ray tube and a Varian 2520DX detector. The scan settings were as follows: 70 kV tube voltage, 200 μ A tube current, 0.55 s exposure time per projection, 1,525 projections per full rotation, averaging of 3 and a voxel size of 19.86 μ m. To minimize image artifacts caused by the high density contrast between the steel sample holder and the wood-based panel specimen, a low-density floral foam (e.g., Smithers-Oasis Germany GmbH, Grünstadt, Germany) was attached to the top of the holder to physically separate the specimen from the metal during scanning. The specimens were aligned with the source and detector such that the scanning direction was in the plane of the board. 3D image reconstruction was performed using the VGStudio Max, version 2022.1 (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Germany).

2.4. Preparation of μ CT scans for pore structure analysis and FEM modelling

The μ CT datasets were processed using Avizo, version 2024.2 (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA), which was used both for pore structure analysis and for preparing the data for FEM simulation of mechanical behaviour. The data processing steps performed in Avizo are described below, while further details on pore structure analysis and FEM simulation are provided in Section 2.5 and 2.7.

To facilitate reproducibility of the μ CT data preparation for pore structure analysis and FEM modelling, a modified screenshot from the Avizo software environment is provided in the

supplementary material. In this screenshot the main evaluation steps are numbered, and correspond to the references in the following text.

(1) First, each scan was spatially aligned, and a new dataset of the transformed volume was generated. (2) Subsequently, a cubic subvolume ($740 \times 740 \times 740$ voxel) was extracted with its lateral faces aligned with the corresponding lateral faces of the specimen. (3) The segmentation editor was then used to separate wood material from air within the specimen with voxels with intensity values ranging from 0–3,000 being assigned to air while wood lies in the range of 5,000–65,535. (4) In the following step, a gradient image was generated to (5) perform a watershed segmentation. (6) Interactive thresholding was applied to isolate the wood material. The resulting binary datasets were used for FEM simulation of mechanical behaviour. In addition, these datasets were further analyzed to characterize the pore structure of the specimens. (7) Assuming that the wood phase formed a fully connected structure, freely floating particles within pores were removed by using the 'Remove Small Spots' function (3D interpretation; minimum size: 12,000 px). (8) Labelling was then applied to verify that the dataset consisted of a single coherent object. This dataset was subsequently used to derive an exemplary pore volume distribution. (9) To prepare the dataset for a subsequent interactive thresholding, the arithmetic tool was applied using the expression $A + 1$ (Input A: label dataset; result channels: same as Input A). (10) By applying interactive thresholding and selecting the air label, only the pore regions within the specimen were extracted. (11) A selective opening was then performed (3D interpretation; iterations: 4; threshold: 1) to remove the narrowest connections between adjacent pores. (12) To eliminate small pores, likely corresponding to wood vessels or tracheid lumens rather than true pores between adjacent particles, the 'Remove Small Spots' command was applied again (3D interpretation, minimum size: 125 px). (13) Labelling (3D interpretation; neighbourhood: 26) was used to identify each separate interparticle pore as an individual object. (14) Finally, the dataset was evaluated to determine the number and volume of all labelled pores.

An exemplary visualization of the main evaluation steps, based on a representative specimen (BT2, specimen 1.2; see Table 1), is shown in Figure 1. It comprises a photograph of the specimen, a grayscale image, the result of the watershed segmentation, and the final dataset, in which only interparticle voids are visible.

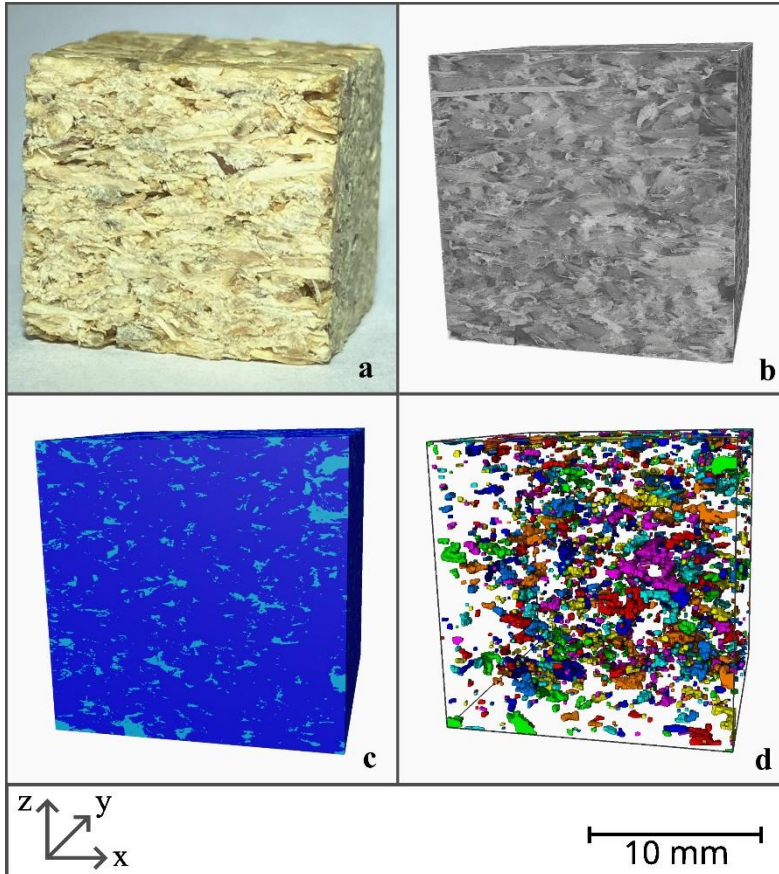


Figure 1 Exemplary photograph and visualization of the main evaluation steps of the μ CT data preparation, based on a representative specimen (BT2, specimen 1.2; see Table 1): (a) photograph, (b) grayscale image, (c) result of the watershed segmentation (dark blue = material; light blue = air), (d) final dataset, in which only interparticle voids are visible. The different colors in (d) are used solely to visually distinguish neighboring voids.

2.5. Analysis of pore structure

To investigate the pore structure of the particleboard specimens, two complementary evaluation approaches were employed, each based on differently processed versions of the same μ CT datasets (see Section 2.4). The first approach focused on pore size distribution derived from partially processed data, whereas the second approach quantified additional pore structure parameters, including pore number, total and mean pore volume, and overall porosity, using fully processed datasets.

The first evaluation approach was based on one representative specimen from each board type. Binary images obtained from μ CT data after segmentation in Avizo (processing steps (1)-(8)) were analysed using the PoroDict module integrated into GeoDict software (version 2024 SP4, Math2Market GmbH, Kaiserslautern, Germany). Pore diameters were determined by fitting virtual spheres into the segmented pore volumes. The resulting sphere diameters were grouped into size classes.

Starting at $0 \mu\text{m}$, the upper limit of the first size class corresponded to the edge length of one voxel ($19.86 \mu\text{m}$). In subsequent classes, the diameters limits were increased in increments of one voxel edge length (e.g., $39.72 \mu\text{m}$ for two voxels, $59.58 \mu\text{m}$ for three voxels, etc.). The pore volume distribution was then obtained by calculating the volume fraction of pores in each diameter class

relative to the total volume of all fitted spheres. As noted above, small pores with a diameter of $< 100 \mu\text{m}$, most corresponding to anatomical pores, were excluded from evaluation.

The second evaluation approach focused on quantifying additional pore structure characteristics, including the pore number, total pore volume, mean pore volume, and porosity. In contrast to the first approach, this analysis was based on fully processed datasets (steps (1)-(14)). Three specimens per board type ($n = 3$) were evaluated, which allows a statistical evaluation of the pore structure parameters. The exclusion of small pores (i.e., anatomical pores), in both evaluation approaches, ensured that the results more specifically reflect the interparticle pore structure.

Instead of fitting virtual spheres, the volume of each individual pore was determined directly by summing the number of voxels assigned to that pore. The total pore volume was calculated for each specimen, and the mean pore volume was then obtained by dividing the total pore volume by the number of detected pores. Porosity was calculated as the ratio of the total pore volume to the total specimen volume.

2.6. Calculation of wood substance density

To assess possible particle-size-dependent densification, the wood substance density of the specimens, accounting for AC and porosity (derived from the sphere fitting method described in Section 2.5., including all fitted spheres), was calculated using Eq. (1):

$$\rho_{ws} = \frac{((100 - AC) \times \rho_{sp})}{(100 - \varphi)} \quad (1)$$

with

ρ_{ws} : Density of the wood substance

AC : Adhesive content

ρ_{sp} : Density of the specimen

φ : Porosity

2.7. FEM simulation of mechanical behaviour

To analyse the mechanical response of the reconstructed microstructure derived from μCT -scanned particleboard specimens, finite element simulations were performed in GeoDict using binary datasets generated in Avizo (steps (1)-(6)). Two loading cases were simulated: three-point bending based on the corresponding laboratory test and uniaxial tension along the specimen length (TensionX), width (TensionY), and thickness (TensionZ). These loading cases were implemented as boundary conditions to the voxel-based finite element models. In all simulations, a linear-elastic material model was assumed, with a fictive MOE of 10 GPa and a fictive Poisson's ratio of 0.2.

For each loading case, voxel-wise strain and stress fields were computed using the FeelMath solver integrated in GeoDict. To obtain representative macroscopic mechanical properties, strain and stress tensors were averaged component-wise across all voxels. Assuming macroscopic linear elasticity, the corresponding components of the stiffness tensor were subsequently derived. In addition, voxel-wise von Mises equivalent stresses, representing the equivalent uniaxial stress for yielding, were calculated to enable comparison across loading cases and to visualise stress distribution within the microstructure. The von Mises stresses are the basis for colour-coded stress visualizations, stress histograms, and, in case of uniaxial tensile simulations, peak stress evaluations. In all stress

histograms the y-axis is scaled logarithmically and in case of the tensile simulations only stress values greater than 0.01 GPa were considered.

In the three-point bending simulations (referred to as *Bending* in the Results section), the setup was based on the experimental approach used to determine MOR and MOE in accordance with DIN EN 310:1993-08. The thickness of the virtual specimens corresponds to the extracted cubic subvolume (740 voxel edge length is equivalent to 14.7 mm). The virtual specimen width was set to 50 mm, and the support span was set to 300 mm in accordance with the laboratory test. A flexural deflection of 1 mm was applied. In the Results section, the resulting simulated elastic modulus is denoted as E_{Ben} (Bending).

For the tensile simulations, the specimen geometry was defined by the extracted cubic subvolume (edge length of 740 voxel equals 14.7 mm). To evaluate the strain-dependent behaviour, a uniaxial deformation of 2% was applied. In the Results section, the corresponding simulated elastic moduli are denoted as E_X (TensionX), E_Y (TensionY) and E_Z (TensionZ). In addition, a stress peak evaluation was conducted for all tensile simulations, as the entire cross-section of the specimen is subjected to load under uniaxial tension. For this purpose, a stress threshold was defined based on the specimen exhibiting the lowest maximum stress. For this reference specimen, the mean and standard deviation of the voxel-wise stress values were calculated, and the threshold was set to the mean plus one standard deviation, corresponding to 1.39 GPa. In the Results section, the average number of voxels exceeding this threshold is reported for each board type and loading direction.

2.8. Statistical analysis

Statistical analysis and graphical representation were performed using JMP 16 (SAS, Cary, NC, USA) and Microsoft Excel 2021 (Microsoft Corporation, Redmond, DC, USA), respectively.

Results are reported as means \pm standard deviations. Statistical tests were selected following the decision path of Benthien et al. (2020) and conducted at a significance level of $\alpha = 0.05$. Tukey's test was used for pairwise mean comparisons, with statistically significant differences indicated by different capital letters in Table 2 and 3. Simulated elastic moduli were normalized to the highest value, which is shown in bold.

3. Results and discussion

3.1. Pore structure

Figure 2 shows the pore volume distributions of three representative specimens from boards produced with particle sizes of 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1). The distributions were obtained using the sphere-fitting method described in Section 2.5. Clear differences between the board types are evident: specimens manufactured from finer particles (1–1.5 mm) show a higher volume fraction of small-diameter spheres, whereas those produced from coarser particles (2–3 mm) show broader distribution with fewer small pores and the presence of large-diameter pores absent in the finer-particle specimens. These results indicate that coarser particles form structures with larger interparticle pores during board manufacture, while finer particles yield a pore network dominated by smaller interparticle pores.

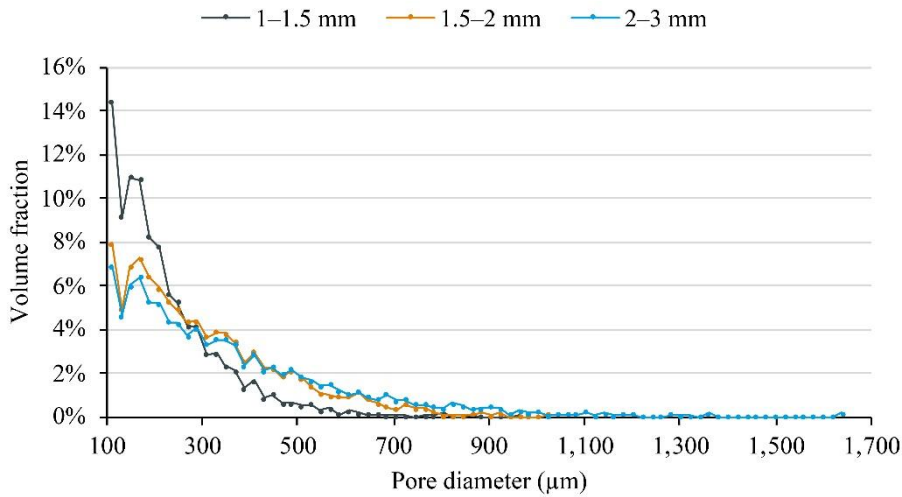


Figure 2 Pore volume distribution for three specimens taken from boards with differing particle sizes of 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1). Pores with diameters below 100 μm , most likely anatomical pores, were excluded.

Quantitative pore structure characteristics were evaluated for three specimens per board type based on fully processed μCT datasets, as described in Section 2.5, and are summarized in Table 2. Mean pore volume increased with particle size across all board types: from 0.05 mm^3 (1–1.5 mm) to 0.16 mm^3 (1.5–2 mm) and 0.26 mm^3 (2–3 mm), with all differences being statistically significant. This trend resulted from a combination of increase in total pore volume and decreasing in pore number. Accordingly, porosity increased from 3% to 11%, indicating a higher volume fraction of interparticle pores in boards produced with coarser particles.

These quantitative results complement the aforementioned observations by confirming that specimens consisting of coarser particles not only exhibit larger pores, as shown by the pore volume distribution, but also a greater total pore volume, which is reflected in the higher porosity values.

Table 2 Summary of pore structure characteristics presented as mean \pm standard deviation, with homogeneous groups indicated by uppercase letters in brackets.

	Particle Size (mm)	n	Pore Count	Total Pore Volume (mm^3)	Mean Pore Volume (mm^3)	Porosity
BT2	1–1.5	3	$1,910 \pm 260$ (A)	94 ± 31 (A)	0.05 ± 0.01 (A)	$3\% \pm 1\%$ (A)
BT3	1.5–2	3	$1,452 \pm 80$ (A)	231 ± 23 (A, B)	0.16 ± 0.02 (B)	$7\% \pm 1\%$ (A, B)
BT4	2–3	3	$1,400 \pm 299$ (A)	361 ± 118 (B)	0.26 ± 0.05 (C)	$11\% \pm 4\%$ (B)

The observed increase in porosity with increasing particle size is consistent with previous findings on tea oil camellia shell-based particleboards (Chaydarreh et al. 2022). The increase in porosity despite nearly constant density suggests that boards made from coarser particles undergo greater localized compaction during pressing. This behaviour can be attributed to strains and stresses being concentrated at fewer contact points in boards made from coarser particles, leading to higher local compaction pressure than in boards manufactured from finer particles. As a consequence, natural pores are more likely to be compressed during pressing, which may partly explain the lower volume fraction of small pores observed in boards made from coarse particles. These assumptions are supported by the densities calculated for the true wood substance based on Eq. 1 (see Section 2.6).

Mean wood substance density increased with particle size across all board types, from 611 kg/m³ for 1–1.5 mm particles to 645 kg/m³ for 1.5–2 mm particles and 712 kg/m³ for 2–3 mm particles. The difference between specimens consisting of finer particles (1–1.5 mm) compared to those consisting of coarser particles (2–3 mm) was statistically significant.

Both, higher porosity and increased mean pore volume are expected to affect the stress-bearing capacity of the material: porosity reduces the effective cross-sectional area available for stress transfer, while larger pores promote local stress concentrations within the surrounding solid matrix. Effective stress transfer can occur only through continuous solid cross-sectional areas or via effective adhesive bonds between adjacent particles. The formation of an effective adhesive bond requires both sufficient overlap between adjacent particles and compressive pressure perpendicular to the bonding surfaces (Rackwitz 1963). Increasing porosity and higher mean pore volume reduce the specific overlap area between neighbouring particles and, consequently, the total surface area available for the formation of effective adhesive bonds. Since these bonds are responsible for stress transfer and redistribution across the material cross-section, their reduction directly impairs the load-bearing capacity.

It should be noted, however, that commonly reported parameters such as the porosity are only indirectly related to stress concentrations. Instead, the decisive factors are the fraction of solid material relative to the total volume or cross-section, as well as its spatial distribution.

3.2. Results of FEM simulation

3.2.1 Stress visualisation and distribution

To illustrate the simulated mechanical response under different loading conditions, Figure 3 shows von Mises stress distributions for a representative specimen (1.2 (BT2)). Stress visualizations are shown for three-point bending (Bending), in-plane tensile loading (TensionY), and tensile loading perpendicular to board plane (TensionZ). For each load case, stresses are graded with a colour scale. Since, the maximum stress values differ between the load cases and the focus here is on stress localization rather than absolute values, numerical stress values are not shown. Regions of highest stress are indicated in red, whereas areas with no stress are shown in dark blue. Intermediate stress levels are represented by a colour gradient from yellow to green. Stress-related colours (red, yellow, and green) occur only within the solid material, thus, dark blue regions correspond either to unstressed material or to interparticle pores.

The von Mises stress visualization for three-point bending shows a typical bending stress distribution, with maximum stresses occurring in the outer fibers and neglectable stresses at the neutral axis. Under in-plane tensile load, stresses are distributed across the entire cross-section, with pronounced stress concentrations occurring in the solid matrix surrounding interparticle pores, particularly near the boundaries of the unstressed pore regions. For tensile loading perpendicular to the board plane, stresses are also found over the entire cross-section, however, in this case they are not consistently associated with the vicinity of interparticle pores.

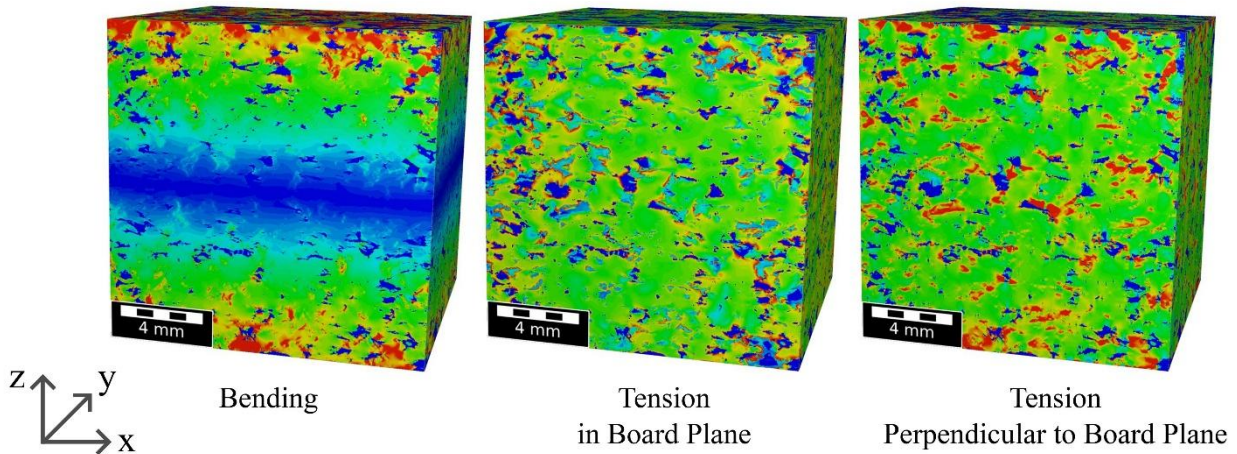


Figure 3 Visualization of von Mises stresses for FEM simulations of different load cases (Bending, TensionY, TensionZ) for one specimen taken from a board with a particle size of 1-1.5 mm (BT2, specimen 1.2; see Table 1). Red indicates maximum stress, dark blue indicates no stress. Since, the maximum stress values differ between the load cases and the focus here is on stress localization rather than absolute values, numerical stress values are not shown.

Although uniaxial von Mises stresses are visualized, the 3-point bending simulations reveal that compressive stresses predominantly occur in the upper edge fibre, while tensile stresses dominate in the lower edge fibre. In contrast, under tensile loading either in the board plane or perpendicular to it, stresses are generally more evenly distributed across the cross-section. In an idealized non-porous material with homogeneous properties, this distribution would be perfectly uniform. The presence of pores, however, leads to localized stress concentrations. For in-plane tensile loading, stresses are particularly concentrated in the solid matrix surrounding interparticle pores, supporting the hypothesis that pores promote stress concentrations, as the effective load-bearing solid fraction decreases with increasing porosity. By comparison, tensile loading perpendicular to the board plane results in a more homogeneous stress distribution across the cross-section, with stress concentrations not consistently associated with the solid matrix surrounding interparticle pores.

Figure 4 shows a juxtaposition of von Mises stress visualizations for in-plane tensile loading (TensionY) for three representative specimens taken from boards with differing particle sizes of 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1). In this case, a colour scale with corresponding stress values is given. For all specimen, the highest stress levels are located at the boundaries of unstressed regions corresponding to interparticle pores. Furthermore, specimens manufactured from coarser particles exhibit larger interparticle pores and a reduced cross-sectional solid fraction compared to those produced from finer particles. As a result, stresses become more strongly concentrated, leading to stress peaks extending over larger areas of the cross-section. Consequently, the stress distribution becomes increasingly heterogeneous with increasing particle size.

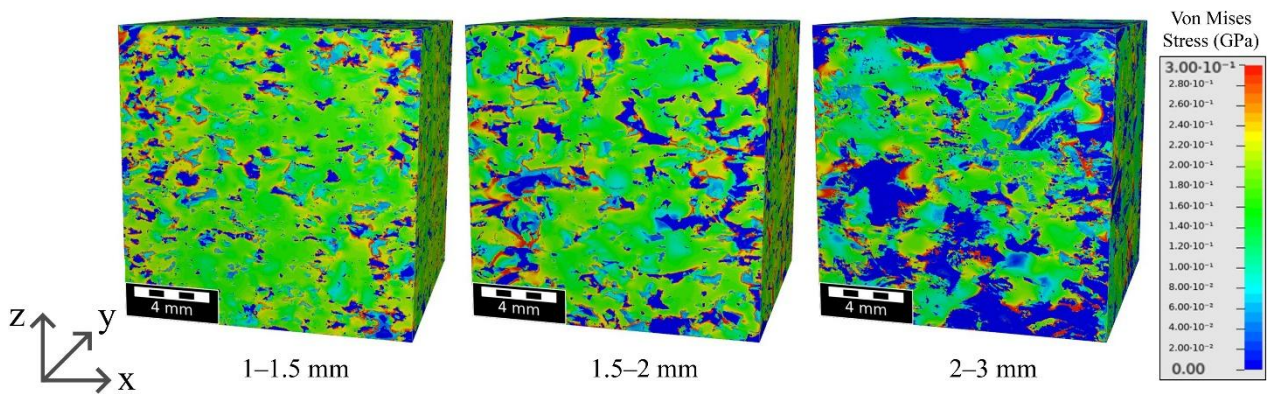


Figure 4 Visualization of von Mises stresses for FEM simulation of tensile load in board plane (TensionY) for three specimens taken from boards with differing particle sizes of 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1).

A less uniform stress distribution across the cross-section, or the concentration of stresses within smaller load-bearing areas in boards made of coarse particles could promote premature failure under mechanical loading. To further analyse the simulated stress states, stress histograms are examined in the following section.

3.2.2 Stress histograms

Figure 5 shows the voxel count as function of von Mises stress for all simulated load cases for three representative specimens taken from boards with differing particle sizes: 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1).

A stress histogram for the simulation of three-point bending is shown in Figure 5a. In low stress ranges from approximately 0–0.02 GPa, the histograms for the different specimens show a similar trend. At higher stress levels, between approximately 0.02–0.1 GPa, differences can be observed. In this range, the number of voxels experiencing high stresses increase with particle size, with specimen manufactured from coarsest having the highest proportion of high stressed voxels, followed by specimens with progressively finer particles.

A stress histogram for the simulation of tension in board plane – here TensionX – is shown in Figure 5b. In a large number of voxels, low stresses occur. Most voxels with low stresses occur in the specimen from the finest particles graded towards the one consisting of the coarsest particles. The opposite is evident for a higher stress range (approximately 0.5–2.0 GPa). Here, more voxels with high stresses occur in the specimen made of the coarsest particles graded towards the specimen consisting of the finest particles.

A stress histogram for the simulation of tension in board plane – here TensionY – is shown in Figure 5c. Compared to the stress histogram shown in Figure 5b, a very similar trend is observed for all specimen. This can be attributed to the fact that the specimens are hand-scattered particleboards, which do not exhibit directional structural differences within the board plane. For industrially manufactured particleboards, clear differences in stress distributions between in-plane loading directions can be expected, as particles tend to align in the production direction during scattering on the moving conveyor belt.

A stress histogram for the simulation of tensile loading perpendicular to board plane (TensionZ) is displayed in Figure 5d. Compared to the histograms for in-plane tensile loading, a similar trend can be observed. However, the differences between the specimen consisting of the finest particles and the specimen consisting of the medium-size particles are less pronounced. This may be attributed to

structural differences between the principal material directions within the board plane and those perpendicular to it.

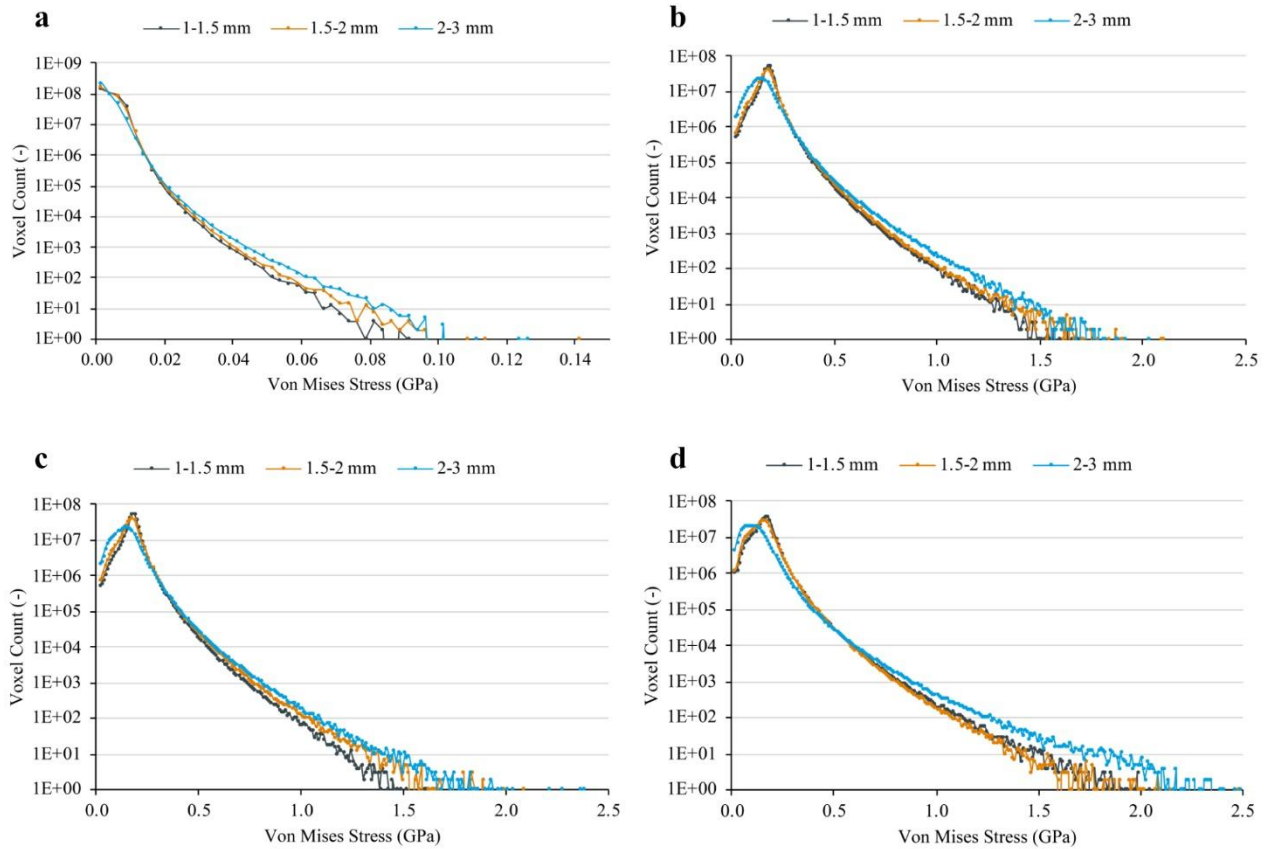


Figure 5 Histograms showing the voxel count as function of von Mises stress for all simulated load cases for three representative specimens taken from boards with differing particle sizes: 1–1.5 mm (BT2, specimen 1.2), 1.5–2 mm (BT3, specimen 2.2) and 2–3 mm (BT4, specimen 3.2) (see Table 1). Depicted load cases: (a) three-point bending (Bending), (b) tension in board plane (TensionX), (c) tension in board plane (TensionY), (d) tension perpendicular to board plane (TensionZ). Y-axis scaled logarithmically.

All loading conditions, exhibit broadly similar distributions across specimen with different particle sizes, although notable differences are observed at high stress levels. In all cases, specimen manufactured from the coarsest particles (2-3 mm) have a greater number of high stressed voxels than those composed of finest particles (1-1.5 mm), which could contribute to an increased likelihood of failure under mechanical loading.

As indicated by the porosity analysis, higher porosity or the presence of larger pores results in a concentration of stress within smaller load-bearing cross-sectional areas. This effect is consistently reflected in the stress histograms, independent of the loading condition: specimens composed of coarser particles exhibit a greater number of voxels subjected to elevated stress than specimens manufactured from finer particles. Since fracture initiation is governed by local stress peaks, these peaks are examined in more detail and compared across the different board types in the following section.

3.2.3 Stress peak evaluation

Figure 6 shows a histogram of the mean voxel count exceeding a stress threshold of 1.39 GPa for each board type under tensile loading in all principal material directions. For all tensile simulations, regardless of the loading direction, the highest number of voxels exceeding this threshold is observed in specimens composed of the coarsest particles (2–3 mm), followed by specimens made from medium-sized (1.5–2 mm) and fine particles (1–1.5 mm), respectively. In other words, in all cases stress peaks occur most frequently in specimens manufactured from the coarsest particles and least frequently in those composed of the finest particles.

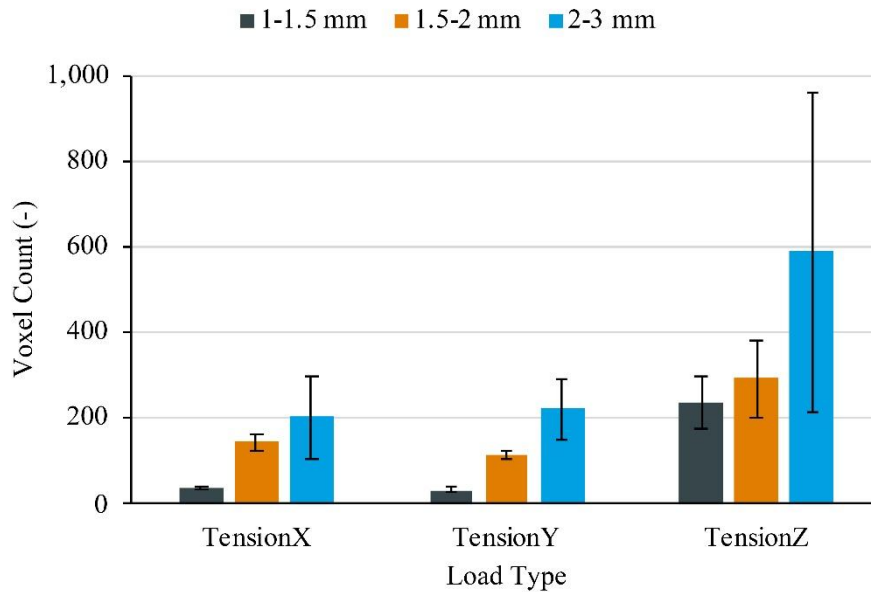


Figure 6 Histogram showing the mean and standard deviation for the count of voxels over all specimens per board type (BT2, BT3, BT4; see Table 1) and tensile load case in which a threshold stress value of 1.39 GPa is exceeded.

Based on the evaluation of stress peaks, a direct correlation can be established between increasing particle size and the reduction in mechanical board properties observed in experimental tests. Notably, for all simulated tensile loading conditions, the number of voxels exhibiting stress peaks increases with particle size. Under real loading conditions, such localized stress concentrations within limited cross-sectional areas are responsible for the initiation of plastic deformation and ultimately lead to material failure.

The characteristics of stress peaks are governed by multiple factors. As indicated by the present results, these include particle-size-dependent porosity, that is, the solid fraction relative to the total volume or cross-sectional area, as well as the spatial distribution of material within the composite. These parameters influence particle interconnectivity and, consequently, the overall mechanical strength of the board. Since the material in this study was modelled using homogeneous properties, the results primarily reflect structural characteristics and their influence on mechanical performance. In practical applications, however, additional factors contribute to stress development and localization. These include particle size and shape, particle orientation (which is partly governed by particle geometry), the inherent anisotropy of wood and its direction-dependent mechanical properties, adhesive distribution, and potential pre-damage to the wood cell structure resulting from compaction during manufacturing.

3.2.4 Simulated Elastic Moduli

The normalized elastic moduli obtained from the FEM simulations for the different loading conditions are summarized in Table 3. For three-point bending as well as for all simulated tensile loading cases, a statistically significant decrease in the simulated elastic moduli is observed with increasing particle size, from fine (1-1.5 mm) to coarse (2-3 mm).

Table 3 Elastic moduli obtained from the FEM simulation of three-point bending (Bending: E_{Ben}) and tensile loading in all principal material directions (TensionX: E_X , TensionY: E_Y , TensionZ: E_Z).

Board Type	Particle Material	n	Simulated Elastic Moduli*			
			E_{Ben}	E_X	E_Y	E_Z
BT2	1–1.5 mm	3	0.99 ± 0.01 (A)	1.00 ± 0.02 (A)	1.00 ± 0.02 (A)	0.87 ± 0.02 (A)
BT3	1.5–2 mm	3	0.90 ± 0.02 (A)	0.90 ± 0.02 (A)	0.89 ± 0.03 (A)	0.75 ± 0.03 (A)
BT4	2–3 mm	3	0.72 ± 0.16 (B)	0.75 ± 0.16 (B)	0.75 ± 0.15 (B)	0.58 ± 0.17 (B)

*Normalized mean \pm normalized standard deviation (reference value printed in bold); homogenous groups represented by uppercase letters in brackets.

The observed decrease in simulated elastic moduli with increasing particle size and increasing size of interparticle voids is consistent with the correlations between particle size and mechanical board properties, particularly MOE, obtained in the laboratory tests (Engehausen et al. 2025). Wu et al. (2004) obtained similar results in FEM simulations on the loading of OSB and identified the weakening effect of voids, which is likewise reflected in a reduction of the simulated elastic moduli. The trend of decreasing elastic moduli with increasing particle size cannot be directly transferred to corresponding strength values. However, previous studies, such as that of Dube and Kehr (1995), demonstrate a positive correlation between MOE and MOR. Consequently, a reduction in the simulated elastic moduli may also indicate a decrease in mechanical strength.

4. Conclusion

In Conclusion, increasing particle size leads to higher porosity and larger interparticle pores, which promote stress concentration under mechanical loading. These stress concentrations result in an increased number of stress peaks and a reduction in load-bearing capacity. FEM simulations show that, for all loading conditions, specimens composed of coarser particles exhibit more pronounced stress localization and significantly lower elastic moduli than specimens made from finer particles. These findings are consistent with the experimentally observed decrease in mechanical board properties with increasing particle size (Engehausen et al. 2025), thereby validating the proposed hypothesis. The modelling approach presented here represents a forward-looking method for analyzing material behaviour using CT-based geometries in combination with FEM simulations. However, the aim of this study was not to achieve an exact quantitative prediction of material properties, but rather to enable a qualitative comparison between board types composed of different particle sizes. For precise property prediction, additional parameters such as particle orientation, direction-dependent strength properties, adhesive characteristics and distribution etc., would need to be incorporated into the modelling framework.

The knowledge of fundamental relationships investigated on single-layer boards in the present paper provides an important basis for the targeted optimization of industrial multilayer particleboards. Ultimately, particle size and the resulting material structure, alongside well studied factors such as density or adhesive content, determine the properties of individual layers and, consequently, the overall performance of multilayer particleboards.

Literature Cited

- Benthien, J.T., Lüdtkke, J., Ohlmeyer, M. 2019. Effect of increasing core layer particle thickness on lightweight particleboard properties. *Eur J Wood Wood Prod* 77(6), 1029–1043.
- Benthien, J.T., 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. *Fibers* 8(7), 46.
- Brumbaugh, J. 1959 Effect of flake dimensions on properties of particle boards. *For. Prod. J.* 10, 243–246.
- Chaydarreh, K. C., Lin, X., Guan, L., Hu, C. 2022. Interaction between particle size and mixing ratio on porosity and properties of tea oil camellia (*Camellia oleifera* Abel.) shells-based particleboard. *J Wood Sci* 68, 43.
- Dube, H., Kehr, E. 1995. Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von MDF und Spanplatten [Relationship between modulus of elasticity and flexural strength of MDF and particleboard]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 53, 116.
- Engehausen N, Benthien JT, Lüdtkke J. 2024. Influence of Particle Size on the Mechanical Properties of Single-Layer Particleboards. *Fibers* 12(4), 32.
- Engehausen, N., Benthien, J.T., Lüdtkke, J. 2025. Investigation on the influence of particle size and surface-specific adhesive amount on mechanical properties and sorption behavior of particleboard. *Eur. J. Wood Prod.* 83, 123.
- Ferro, F.S., Arroyo, F.N., Rodrigues, E.F.C., Fraga, I.F., Almeida, J.P.B., Ruthes, H.C., Aquino, V.B.M., Morales, E.A.M., Moraes, M.H.M., Lahr, F.A.R., Christoforo, A.L. 2021. Investigation of pore size distribution by mercury intrusion porosimetry (MIP) technique applied on different OSB panels. *BioResources* 16(4), 6661.
- Huang, Q., Ma, G., Matsushima, T., Zhou, W., Lin, M. 2021. Effect of disordered pore distribution on the fracture of brittle porous media studied by bonded DEM. *Soils and Foundations* 61(4), 1003-1017.
- Istek, A., Aydin, U., Ozlusoylu, 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, 26–29.
- Junghans, K., Niemz, P., Bächle, F. 2005. Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Vergütung auf die Porosität von Fichtenholz [Investigations on the influence of thermal tempering on the porosity of spruce wood]. *Holz Roh Werkst* 63, 243–244.
- Kitahara, K., Kasagi, K. 1955. Effects of raw chip dimensions on the physical and mechanical properties of chipboard. *Wood Ind.* 10, 406–412.
- Kollmann, F. 1987. Poren und Porigkeit in Hölzern [Pores and porosity in wood]. *Holz als Roh-und Werkstoff* 45, 1–9.
- Liiri, O. 1960. Investigations on particle preparation and the significance of particle properties in the manufacture of particle board I. *Pap Puu* 42, 57–62.
- Pfriem, A., Zauer, M., Wagenführ, A. 2009. Alteration of the pore structure of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and maple (*Acer pseudoplatanus* L.) due to thermal treatment as determined by helium pycnometry and mercury intrusion porosimetry. *Holzforschung* 63(1), 94-98.

- Plötze, M., Niemz, P. 2011. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. *Eur. J. Wood Prod.*, 69(4), 649-657.
- Rackwitz, G. 1963. Der Einfluß der Spanabmessungen auf einige Eigenschaften von Holzspanplatten [The influence of particle dimensions on some properties of wood particleboards]. *Eur. J. Wood Prod.* 21(6), 200-209.
- Rahman, W.M.N.W.A., Yatim, A.A., Zlan, A.A., Kasim, J., Yunus, N.Y. 2019. Effects of the resin content and particle size on the properties of particleboard made of neolamarckia and leucaena particles. *BioResources* 14(3), 6079-6087.
- Röllig, P., Tudor, E.M., Barbu, M.C., Direske, M. 2024. Effect of the particle geometry on lightweight particleboard from Paulownia using high-frequency pressing technology. *Wood Mater Sci Eng* 19(3), 683–690.
- Schneider, A. 1979. Beitrag zur Porositätsanalyse von Holz mit dem Quecksilber-Porosimeter [Contribution to the porosity analysis of wood with the mercury porosimeter]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 37, 295–302.
- Schneider, A., Wagner, L. 1974. Bestimmung der Porengrößenverteilung in Holz mit dem Quecksilber-Porosimeter [Determination of the pore size distribution in wood with the mercury porosimeter]. *Holz als Roh- und Werkstoff* 32, 216–224.
- Sperry, J.S., Hacke, U.G., Pittermann, J. 2006. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American journal of botany* 93(10), 1490-1500.
- Wagenführ, R., Wagenführ, A. 2021. Holzatlas [Wood atlas]. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Wu, Q., Lee, J. N., Han, G. 2004. The Influence of Voids on the Engineering Constants of Oriented Strandboard: A Finite Element Model. *Wood and Fiber Science* 36(1), 71-83.

Author contributions

Conceptualization, N.E., J.L., A.K. and L.H.; methodology, N.E., S.R., M.K., A.K. and L.H.; investigation, formal analysis N.E., S.R., M.K., A.K.; writing - original draft preparation, N.E.; writing - review and editing, N.E., J.T.B., J.L., S.R., M.K., A.K. and L.H.; project administration, J.L.; funding acquisition, N.E., J.T.B. and J.L. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

The 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 the research project “Dreidimensionale Partikelvermessung und Prozessintegration in die Spanplattenherstellung” (Three-dimensional particle measurement and process integration in particleboard production), funding code 2220HV090X.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Eidesstattliche Versicherung

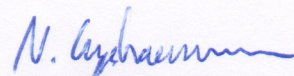
Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben. Sofern im Zuge der Erstellung der vorliegenden Dissertationsschrift generative Künstliche Intelligenz (gKI) basierte elektronische Hilfsmittel verwendet wurden, versichere ich, dass meine eigene Leistung im Vordergrund stand und dass eine vollständige Dokumentation aller verwendeten Hilfsmittel gemäß der Guten wissenschaftlichen Praxis vorliegt. Ich trage die Verantwortung für eventuell durch die gKI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Affidavit

I hereby declare and affirm that this doctoral dissertation is my own work and that I have not used any aids and sources other than those indicated. If electronic resources based on generative artificial intelligence (gAI) were used in the course of writing this dissertation, I confirm that my own work was the main and value-adding contribution and that complete documentation of all resources used is available in accordance with good scientific practice. I am responsible for any erroneous or distorted content, incorrect references, violations of data protection and copyright law or plagiarism that may have been generated by the gAI.

Hamburg, 19.01.2026

Ort, Datum / Place, Date



Unterschrift / Signature