

AiF-Forschungsvorhaben Nr. 17644 N

Simulationsgestützte Entwicklung von mitteldichten Faserplatten für den Leichtbau (MDF-Simulation)

Durchgeführt von

Forschungsstelle 1:

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)

Bienroder Weg 54 E, 38108 Braunschweig

Projektleitung: Dr. Brigitte Dix †, Dr. Burkhard Plinke

Forschungsstelle 2:

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM)

Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern

Projektleiter: Dr. Heiko Andrä

Laufzeit: 1.1.2013 bis 31.12.2015

Eine simulationsgestützte Entwicklung von Faserwerkstoffen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften bei geringer Materialdichte leistet einen erheblichen Beitrag für ein nachhaltiges Wirtschaften und eine bessere Rohstoffeffizienz. Ziele des Verbundprojekts waren

- die simulationsgestützte Entwicklung leichter MDF mit hohen Festigkeiten,
- der Aufbau eines vollständigen Mikro- Makro-Simulationsmodells für MDF,
- die Entwicklung von Verfahren zur gezielten Faserorientierung bei Leicht-MDF.

Mikrostruktureigenschaften, wie z. B. Faservolumenanteil, -orientierung, -länge, -steifigkeit bestimmen maßgeblich die makroskopischen mechanischen Eigenschaften von MDF. Mit Hilfe der Mikro-Computertomographie (μ CT) in Kombination mit Modellierungsansätzen (Multiskalenmethoden) sollte der Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und makroskopischen Eigenschaften aufgeklärt werden.

MDF werden üblicherweise ohne gezielte Faserorientierung hergestellt. Im Vorhaben wurden mechanische Verfahren zur Ausrichtung der MDF-Fasern erprobt und der Einfluss der Orientierung der Fasern auf die mechanischen Eigenschaften der MDF untersucht. Diese Kurzdarstellung enthält nur wesentliche Ergebnisse, Details sind dem Schlussbericht zu entnehmen.

Faserorientierung

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden am Fraunhofer WKI verschiedene Ansätze zum mechanischen Ausrichten konventioneller MDF-Faserstoffe untersucht. Die Orientierungsergebnisse wurden qualitativ und quantitativ anhand von digitalisierten Aufnahmen von Vliesoberflächen bewertet. Für das favorisierte Verfahren wurde ein

Versuchsaufbau entwickelt. Für die Ausrichtung der Fasern ist eine Auflösung der Faseragglomerate unabdingbar; dies wurde weitgehend mit einem vibrierenden Sieb (Maschenweite: 2 mm) erreicht. Die anschließende Orientierung der Fasern erfolgte mit Hilfe von parallel angeordneten Steghölzern, der Austrag der orientierten Fasern erfolgte zwischen den Stegräumen. Ein Ablegen von Fasern über die gesamte Plattenbreite wurde mit einem pneumatisch betriebenen Verfahrtisch erzielt. Abb. 1 zeigt Faservliese aus nicht orientierten und orientierten Fasern.



Abb. 1: Faservliese ohne gezielte Vorzugsrichtung (links) und mit Vorzugsrichtung (rechts), Faserorientierung: V-Nut/Langlochblech.

Um die Auswirkungen der Faserorientierung auf die physikalischen Platteneigenschaften zu untersuchen, wurden aus den orientierten und nicht orientierten, jeweils mit eMDI beaufschlagten Fasern 8 mm dicke MDF hergestellt:

- O-MDF - einschichtig; vereinzelte, orientierte Fasern
- V-MDF - einschichtig; vereinzelte, nicht orientierte Fasern
- S-MDF - einschichtig; nicht vereinzelte, nicht orientierte Fasern
- 3-Schicht - dreischichtig; vereinzelte, orientierte Fasern, jede Faserschicht ca. 33 % der Plattendicke, mittlere Faserschicht um 90° gegenüber Deckschichten gedreht.

Am deutlichsten hat sich die Faserorientierung auf die Biegefestigkeitswerte ausgewirkt (vgl. Abb. 2). In Orientierungsrichtung der Fasern (O-MDF längs) wurde eine Erhöhung der Biegefestigkeit von etwa 25 % gegenüber der von quer zur Faserorientierung geprüften Probe (O-MDF quer) sowie den Referenzplatten (V-MDF und S-MDF) festgestellt. Die Biegefestigkeit der 3-schichtigen MDF war höher als die der 1-schichtigen MDF. Auch bei den 3-schichtigen MDF wurden die höchsten Biegefestigkeitswerte in Faserrichtung der Deckschicht (3-Schicht längs) erzielt. Die Biegefestigkeit der Proben in Faserrichtung der Deckschicht war ca. 12 % höher als die der Proben quer zur Faserrichtung der Deckschicht (3-Schicht quer).

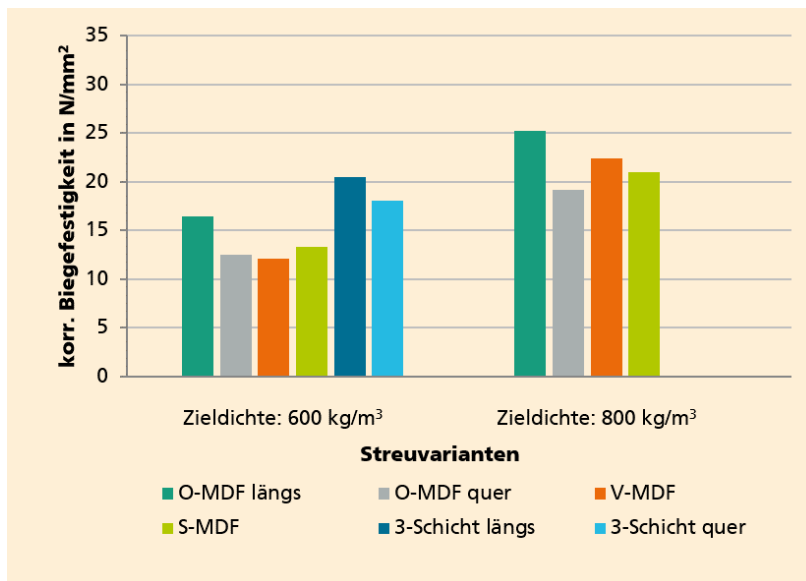


Abb. 2: Biegefestigkeit von eMDI-gebundenen MDF (Dichte 600 kg/ m³) in Abhängigkeit von der Streuvariante, Faserorientierung: V-Nut/ Langlochblech.

Das bisherige Verfahren zur Orientierung war jedoch relativ aufwändig. Daher wurden im weiteren Projektverlauf Faserstoffe mit einer Labor-Kardiermaschine orientiert und daraus UF-Harz-gebundene 8 mm dicke MDF in verschiedenen Varianten hergestellt:

- A - einschichtige MDF aus kardierten Fasern (unidirektional)
- B - einschichtige MDF aus nicht kardierten Fasern
- C - dreischichtige MDF; Deckschichten aus kardierten Fasern, Mittelschicht aus nicht kardierten Fasern; verschiedene Anteile von Deck- und Mittelschichten an der Plattendicke

Bei den ein- und dreischichtigen MDF aus kardierten Fasern wirkte sich die Faserorientierung ebenfalls auf die Festigkeiten aus: Die höchsten Biegefestigkeitswerte wurden in Faserrichtung der Deckschicht erzielt (Abb. 3). Die Biegefestigkeit der MDF in Faserrichtung der Deckschicht war ca. 40 % (einschichtige MDF) bzw. 18 % (dreischichtige MDF) höher als die der MDF quer zur Faserrichtung der Deckschicht. Die dreischichtigen MDF ergaben höhere Querzugfestigkeiten als die einschichtigen MDF (Abb. 4).

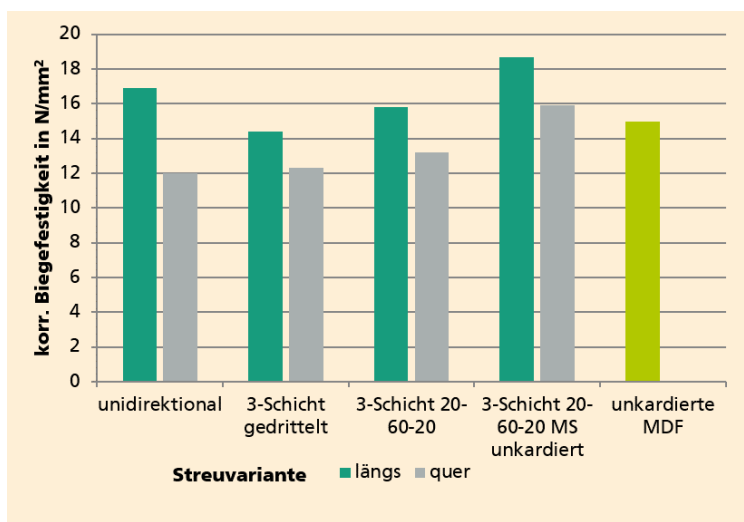


Abb. 3: Biegefestigkeit von eMDI-gebundenen MDF (Dichte 600 kg/m³) in Abhängigkeit von der Streuvariante, Faserorientierung: Kardiermaschine.

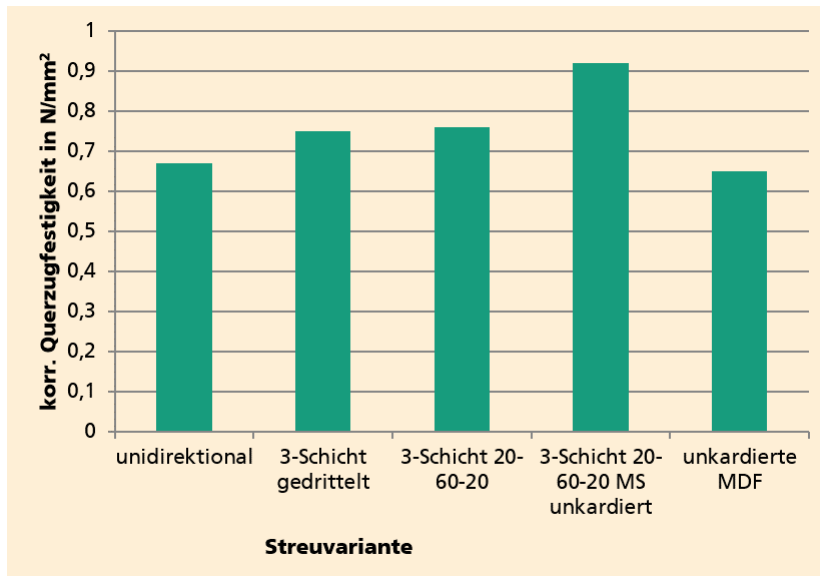


Abb. 4: Querkzugfestigkeit von UF-Harz-gebundenen MDF (Dichte 600 kg/m³) in Abhängigkeit von der Streuvariante, Faserorientierung: Kardiermaschine.

Insgesamt ergaben sich beim Einsatz orientierter Fasern deutliche Steigerungen bei der Plattenfestigkeit bei nur geringen Auswirkungen auf die übrigen physikalischen Parameter. Bei den Ergebnissen ist jedoch zu berücksichtigen, dass jeweils nur wenige Proben aus einer Platte/Variante geprüft wurden. Der Schlussbericht zum Vorhaben enthält weitere Ergebnisse, u.a. der Bestimmung der Fasergrößenverteilungen durch Sieb- und Bildanalyse, der radiometrisch und gravimetrisch gemessenen Dichteverteilung in Plattenebene und der mikroskopischen Beurteilung der Klebstoffverteilung.

Methodik der Zweiskalensimulation

Im Rahmen des Verbundprojekts wurde am Fraunhofer ITWM ein Zweiskalenmodell entwickelt, um den funktionalen Zusammenhang zwischen Fasereigenschaften (Mikroskala) und mechanischen Eigenschaften von MDF (Makroskala) zu berechnen, d. h. die Steifigkeit und Festigkeit der Faserplatte sollte vorhergesagt werden, ohne dabei auf Messungen an Prototypen zurückzugreifen.

Zur Entwicklung des Simulationsverfahrens waren zuerst umfangreiche Messungen zur Aufklärung der geometrischen Mikrostruktur (Faserlänge, Faserdicke, Faserorientierung) und zur Dichteverteilung in einem bestimmten Faserplattentyp notwendig. Dazu wurden binarisierte dreidimensionale Bilder von μ CT-Aufnahmen der MDF als Vorlage für die Erstellung von Mikrostrukturen (Fasernetzwerke in Volumenelementen) im Computer verwendet, die die gleichen stochastischen Eigenschaften besitzen. Mit den entwickelten Mikromodellen wurden die Biege- und Querkzugfestigkeit simuliert. Die berechneten Festigkeiten werden mit den entsprechenden experimentell bestimmten Festigkeiten der MDF verglichen. Zur Kalibrierung der Materialparameter für das neue Zweiskalenmodell mussten weiterhin die standardisierten Materialprüfungen zur Steifigkeit und Festigkeit für diesen MDF-Typ durchgeführt werden. Ziel dieser aufwändigen Entwicklung eines Mikro-Makro-Modells für MDF war es, für andere potenzielle MDF-Varianten ohne oder mit einem wesentlich kleineren Messaufwand die Steifigkeit und Festigkeit sehr genau vorherzusagen.

Die Vorhersagegüte des Zweiskalen-Modells wurde für die Faserorientierung studiert, indem Faserplatten mit isotrop und anisotrop orientierten Fasern simuliert und hergestellt werden.

Später können mit dem Modell, das schrittweise weiter verbessert wird, auch fast alle anderen Mikrostrukturparameter des Fasernetzwerkes und deren Einfluss auf das makroskopische Verhalten betrachtet werden.

Der erste Schritt zur Entwicklung des Mikrostrukturmodells ist die Rekonstruktion der Faserorientierung. Dazu stellte die Fa. GE Sensing & Inspection Technologies im Rahmen des Projekts hochaufgelöste μ CT-Aufnahmen zur Verfügung. Ein Beispiel mit einer Auflösung von $4\text{ }\mu\text{m}$ (Kantenlänge eines Voxels, d.h. würfelförmigen Volumenelementes) ist in Abb. 5 dargestellt. Diese hohe Auflösung ist immer noch nicht ausreichend, um die einzelnen Fasern zu segmentieren bzw. zu rekonstruieren. Jedoch reicht diese Qualität, um nach mehreren Bildverarbeitungsschritten die Faserorientierung, die durch einen Tensor 2. Stufe beschrieben wird, mit mathematischen Verfahren zu berechnen. Mit der gewählten Auflösung kann die halbe Plattendicke gescannt werden, was mit einer höheren Auflösung nicht mehr möglich wäre. Als zweiten Input für das Mikrostrukturmodell (Fasernetzwerk) wurden die Längen- und Dickenverteilungen der Fasern gemessen.

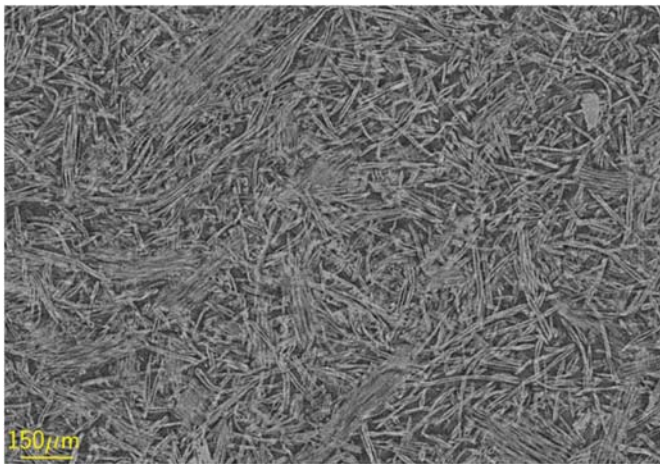


Abb. 5: μ CT-Aufnahme einer MDF (Darstellung einer Schnittfläche in Plattenebene): Lumen und Faserbündel sind deutlich zu erkennen. Die Fasern sind nicht orientiert.

Mit diesen Informationen und einer vorgegebenen Dichte kann dann ein sogenanntes repräsentatives Volumenelement (RVE) in zwei Teilschritten generiert werden. Im ersten Teilschritt wird ein Faserablageprozess simuliert, der aber noch nicht dem realen Herstellungsprozess entspricht. Das Ergebnis ist ein Fasernetzwerk mit nicht überlappenden Fasern und einer zu geringen Dichte (Abb. 6 links). Im zweiten Teilschritt muss deshalb das Fasernetzwerk komprimiert werden. Mit der Software GeoDict® der Fa. Math2Market wird diese Kompression über die Lösung eines Elastizitätsproblems physikalisch fundiert simuliert. Das Ergebnis ist ein Volumenelement mit der gewünschten Faserdichte und Faserorientierung (Abb. 6 rechts). Die Diskretisierung der Fasernetzwerke erfolgt auf Voxel-Gittern. Voxel, die nicht vollständig mit Fasermaterial (Cellulose) gefüllt sind, sind in Abb. 6 rechts grau dargestellt.

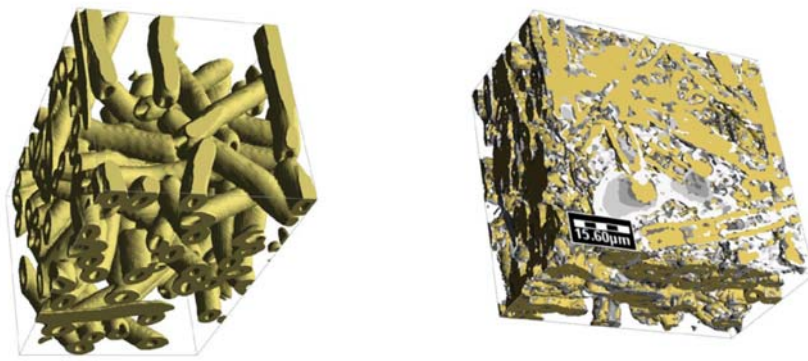


Abb. 6: Links - mit GeoDict ® über die Simulation eines Faserablageprozesses generiertes Fasernetzwerk. Rechts - Komprimiertes Fasernetzwerk, ebenfalls mit GeoDict® berechnet w
Der zweite Schritt ist die Entwicklung eines Materialmodells für die Mikrostruktur (Fasernetzwerk). Hier gehen die anisotropen elastischen Eigenschaften der Holzfasern ein. Der Klebstoff wird elastisch isotrop modelliert. Für das nichtlineare mechanische Verhalten wird ein anisotropes Schädigungsmodell verwendet.

Der dritte Schritt ist die Entwicklung der gekoppelten Mikro- Makro-Simulation. Für die Simulation auf der Makroskala kann jede standardmäßige Software zur Finite-Elemente-Analyse verwendet werden, die es dem Benutzer erlaubt, eigene nichtlineare Materialgesetze zu implementieren. Für jedes finites Element wird in dem speziellen Materialgesetz geprüft, ob die Spannungsantwort für die aktuellen Verzerrungen bereits vorab berechnet worden sind. Wenn dies nicht der Fall ist, wird eine Mikro-Simulation durchgeführt. Die Methode ist ausführlich in weiterführenden Publikationen zum Projekt beschrieben.

Ergebnisse der Simulation

Für eine MDF mit einer Dichte von 600 kg/m^3 wurde das Dichteprofil über die Dicke ermittelt und daraus eine mittlere Dichte für die Plattenoberfläche und den Plattenkern bestimmt. Für diese Dichten wurden danach mehrere Volumenelemente (RVEs), wie oben beschrieben, erstellt. Mit der entwickelten Zweiskalen-Technik können jeweils die Querkzugfestigkeit und die Biegesteifigkeit berechnet werden. Für die Biegesteifigkeit ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den entsprechenden Messungen (Abb. 7). Die Variation der Querkzugfestigkeit ist in der Simulation allerdings wesentlich kleiner als im Versuch. Das Zweiskalen-Modell soll weiter verbessert werden.

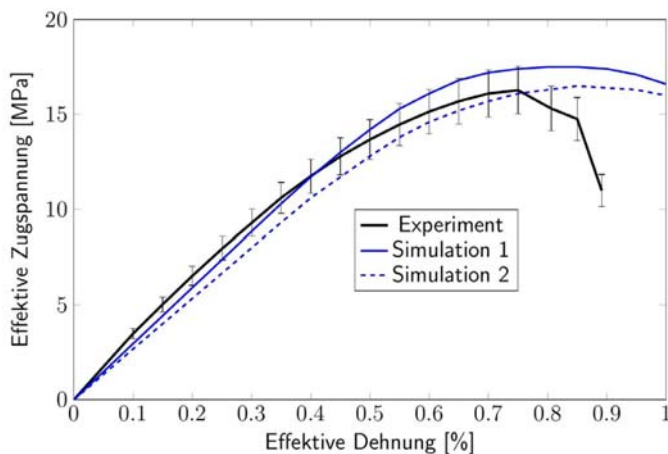


Abb. 7: Vergleich der Biegesteifigkeit an der Oberfläche der MDF.

Abb. 8 zeigt die Steifigkeit bei unterschiedlich stark orientierten Fasern (Orientierung in der Plattenebene). Eine stärkere Orientierung (Anisotropie 5) führt zu einer um 40 % größeren Steifigkeit in Orientierungsrichtung, was auch plausibel ist. Eine nur theoretisch mögliche vollständige Ausrichtung der Fasern würde die Steifigkeit aber lediglich um weitere 20 % steigern, wäre also auch technologisch nicht sinnvoll.

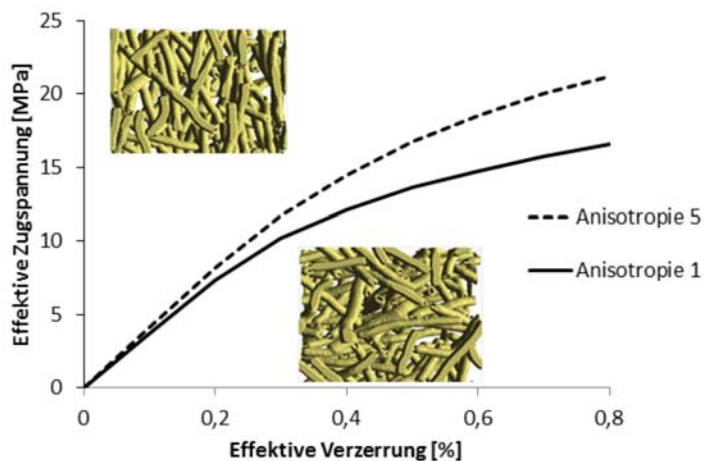


Abb. 8: Vorhersage der Steifigkeit in Abhängigkeit der Faserorientierung

Charakterisierung von Faserstrukturen

Um das Simulationsmodell zu erweitern, wurden auch die Faserorientierung und der Einfluss von Faserbündeln anhand von μ CT-Aufnahmen untersucht. Da die Längenverteilung der Faserbündel großen Einfluss auf Biegesteifigkeit und Festigkeit hat, sind gewinnen genaue und robuste Algorithmen zur Detektion und Segmentierung von Faserbündeln bei der Bildanalyse von μ CT-Daten sehr wichtig. Zudem hängen die hygroskopischen und akustischen Eigenschaften von MDF von der Faserbündellängenverteilung ab.

An fünf weiteren μ CT-Aufnahmen (vier Laborplatten aus dem WKI, eine Industrieplatte) wurde die Faserorientierung mit Hilfe der im ITWM entwickelten Software MAVI analysiert (Abb. 9). Für die orientierten Schichten wurde dabei ein Verhältnis der Koeffizienten des

Faserorientierungstensors von 1,2 ermittelt. Zusätzlich wurde eine Methode entwickelt, um die Lage, Größe und Orientierung von Faserbündeln in der Mikrostruktur zu charakterisieren. Diese Methode wurde auf die 4 μ CT-Aufnahmen von Laborplatten angewandt. Der Volumenanteil der Faserbündel variiert von 5% zu 40%. Weiterhin sind die Faserbündel gleichmäßig in der MDF-Platte verteilt und die Faserbündelorientierung stimmt im Wesentlichen mit der Orientierung der Einzelfasern überein. Der höchste Faserbündelvolumenanteil trat in der dreischichtigen MDF auf.

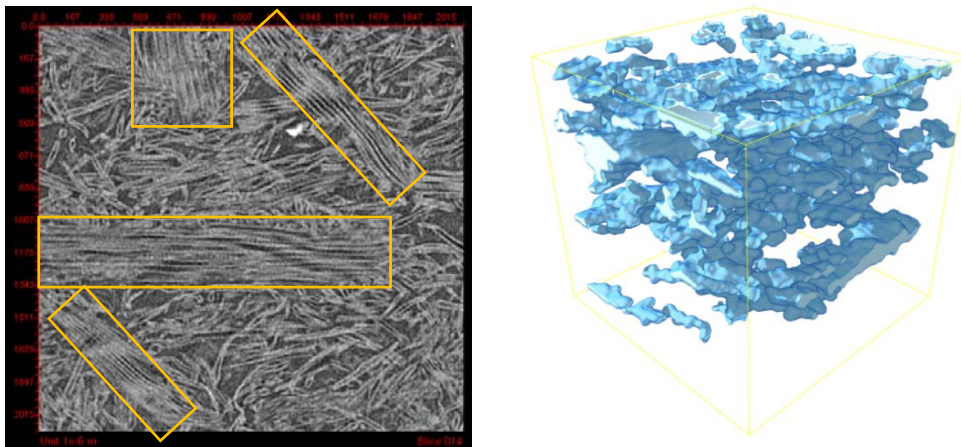


Abb. 9: Faserbündelanalyse mit MAVI für eine Aufnahme mit 8 mm Durchmesser und 6 mm Höhe bei einer Auflösung von 4 μ m. 2D Sicht (links) und segmentierte Faserbündel in der 3D-Draufsicht (rechts)

Für übereinander liegende Bildebenen wurde ein Vergleich der manuell und automatisch detektierten Faserbündel-Flächenanteile durchgeführt, siehe Abb. 10. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung zwischen automatisch und manuell detektierten Faserbündeln festgestellt.

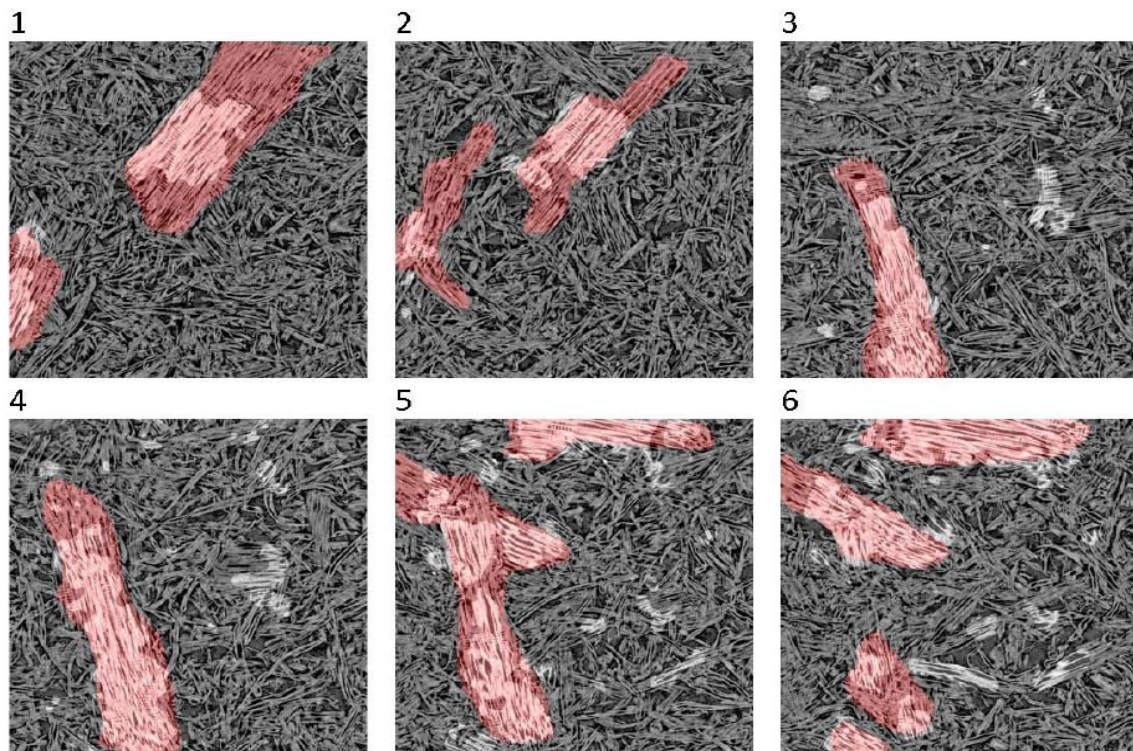


Abb. 10: Vergleich manuell (dunkelrot) und automatisch (hellrot) segmentierter Faserbündel, beispielhaft dargestellt für eine Auswahl von Ausschnitten

Eine genaue Auswertung der Faserbündellängenverteilungen im Vergleich industriell sowie im WKI hergestellter Faserplatten ergab, dass die Industrieplatten durch ungefähr doppelt so viele und sowohl im Mittel als auch im Maximum doppelt so lange Faserbündel charakterisiert sind.

Projektergebnisse

Bisher wird bei der Herstellung mitteldichter Faserplatten (MDF) die Faserorientierung nicht gezielt eingestellt. Im Projekt wurde daher die Faserorientierung erprobt und nachgewiesen, dass leichte mitteldichte MDF mit guten mechanischen Eigenschaften hergestellt werden können.

Aus simulierten virtuellen Fasernetzwerken mit real gemessenen Partikelgrößenverteilungen wurden durch Zwei-Skalen-Simulation Festigkeitseigenschaften berechnet, die gut mit Messwerten übereinstimmten. Zusätzlich wurde das Instrumentarium erweitert um die Betrachtung von Faserbündeln, die bei MDF einen Beitrag zur Festigkeit liefern. Somit konnte der Nutzen angepasster Simulationsverfahren für den Holzpartikelwerkstoff MDF demonstriert werden.

Die Simulationsergebnisse legten nahe, dass MDF mit orientierten Fasern verbesserte Festigkeitswerte aufweisen. Daher wurden zwei Verfahren zu Faserorientierung praktisch erprobt. Beachtliche Festigkeitssteigerungen bei sonst gleichem Materialeinsatz wurden praktisch nachgewiesen.

Die im Vorhaben bei der Zwei-Skalen-Simulation eingesetzten Methoden können als Zusatzfunktionen integriert werden in einschlägige Software.

Das zur Faserorientierung eingesetzte Kardiervorhaben müsste für einen industriellen Einsatz in der MDF-Herstellung hochskaliert werden. Dies ist eine technologische Herausforderung. Es bietet sich daher an, ein Anschluss-Vorhaben zu konzipieren.

Details zu den eingesetzten Methoden und weitere Ergebnisse sind im Abschlussbericht und in den Publikationen enthalten.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17644 N der Forschungsvereinigung Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:

Internationaler Verein für Technische Holzfragen e.V. (iVTH)
Bienroder Weg 54E
38108 Braunschweig

Publikationen (Auswahl)

Dix, B. und Andrä, H. (2014): Simulationsgestützte Entwicklung von leichten mitteldichten Faserplatten (MDF) - Teil 1: Faserorientierung. iVTH-Kurzbericht 1/2014. Braunschweig: Wilhelm-Klauditz-Institut, 2014

Dix, B. und Andrä, H. (2014): Simulationsgestützte Entwicklung von leichten mitteldichten Faserplatten (MDF) - Teil 2: Zweiskalensimulation. iVTH-Kurzbericht 2/2014. Braunschweig: Wilhelm-Klauditz-Institut, 2014

Sliseris, J., Andrä, H., Kabel, M., Dix, B., Plinke, B., Wirjadi, O. und Frolovs, G. (2014): Numerical prediction of the stiffness and strength of medium density fiberboards. In: Mechanics of Materials 75(2014), S. 73-84 DOI: 10.1016/j.mechmat.2014.08.005

Sliseris, J., Andrä, H., Kabel, M., Wirjadi, O., Dix, B. und Plinke, B. (2015): Estimation of fiber orientation and fiber bundles of MDF. In: Journal of Materials Science (2015), DOI: 10.1617/s11527-015-0769-1