

# Mikrostruktursimulation der mechanischen Deformation von Fasermaterialien

Dr. Heiko Andrä, Dipl.-Math. Andreas Fink, Dr. Matthias Kabel, Dr. Janis Sliseris und

Dr. Sarah Staub

Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

## Abstrakt

Die Deformation von porösen Natur- und Kunstfasermaterialien unter Zug-, Druck- oder Biegebelastung hängt sehr stark von den geometrischen und mechanischen Eigenschaften der verwendeten Fasern und den Eigenschaften der Faser-Faser-Kontaktstellen ab. In den betrachteten Materialien besitzen die Fasern häufig eine Orientierung, die zu elastisch anisotropen Eigenschaften führt. Um das Materialverhalten beim Herstellungsprozess und im Einsatz vorherzusagen werden in dieser Arbeit Fasernetzwerkmodelle zur Beschreibung der Mikrostruktur verwendet. Im Vergleich zu ähnlichen Verfahren werden sehr komplizierte dreidimensionale Fasernetzwerke mit einem effizienten numerischen Verfahren gelöst. Das Lösungsverfahren basiert auf einer Formulierung der Elastizitätsgleichungen als Integralgleichung vom Lippmann-Schwinger-Typ. Diese Integralgleichungen werden iterativ mit Hilfe der schnellen Fourier-Transformation (FFT) gelöst. Die Anwendung dieser Lösungstechnik auf poröse Medien ist neu.

Im Vortrag werden Simulationsergebnisse für verschiedene Fasermaterialien erläutert und diese mit entsprechenden Messungen verglichen. Dabei werden geometrisch und physikalisch nichtlineare Verformungen betrachtet.

Mit Hilfe der entwickelten Mikrostruktursimulationstechnik (Softwarepaket FeelMath) lässt sich die Abhängigkeit der makroskopischen Deformationseigenschaften von den Eigenschaften der Einzelfasern und der Faserorientierung analysieren. Damit kann die Anzahl der notwendigen Messungen reduziert werden und die Eigenschaften der Materialien lassen sich für den speziellen Einsatzzweck optimieren.

Das vorgestellte Lösungsverfahren ist ebenfalls für nichtporöse Verbundwerkstoffe und zur Lösung von Wärmeleitproblemen in Fasernetzwerken geeignet.

# 1. Einführung

Verpackungsmaterial aus Karton findet in immer mehr Produktgruppen eine Anwendung. So kann man heutzutage immer mehr Produkte in einer Kartonverpackung kaufen. An die Verpackung werden hohe Ansprüche gestellt, sodass die Verpackung stabil, leicht und kostengünstig und rezyklierbar ist. Präzise und schnelle Simulationsmöglichkeiten sind notwendig, um die Deformations- und Festigkeitseigenschaften und den Einfluss der Fasereigenschaften zu verstehen und optimieren zu können. Das erlangte Wissen kann genutzt werden, um die Steifigkeiten und maximal zulässigen Belastungen zu maximieren. Bei der Herstellung von Kartonverpackungen wird das Ausgangsmaterial oft mechanisch umgeformt bzw. strukturiert, z.B. durch Tiefziehen, Prägung oder Faltung. Zur genaueren Vorhersage des Einflusses der Mikrostruktur und der Fasereigenschaften auf das Herstellungsverfahren sind ebenfalls Simulationsverfahren wünschenswert, bei denen die Mikrostruktureigenschaften des Fasermaterials direkt berücksichtigt werden. Karton besteht aus einem Zellulosefasernetzwerk, in dem die Fasern an mehreren Kontaktstellen miteinander verbunden sind. Die Faserverbindung hat einen großen Einfluss auf die Festigkeit und Steifigkeit (Eichhorn & Young, 2003; Stoeckel, et al., 2013). Durch numerische Berechnungen kann man sehen, dass im Falle von großen Deformationen die elastoplastischen Verbundbrüche und die Gleitreibung der Fasern eine wesentliche Rolle spielen (Liu, et al., 2011; Wilbrink, et al., 2013). Eine Möglichkeit, einen Zellulosefaserflaum zu modellieren, wird in (Heyden, 2000) vorgestellt. Allerdings werden in diesen Arbeiten die Fasern durch endliche Balkenelemente dargestellt, so dass folglich keine Querdeformationen berücksichtigt werden können.

Die Komplexität des Fasernetzwerks führt zu einem nichtlinearen Materialverhalten (Sliseris & Rocens, 2010; Sliseris & Rocens, 2013a; Sliseris & Rocens, 2013b). Dieses nichtlineare Verhalten muss beachtet werden, wenn man die Festigkeit des Materials berechnen will. Eine nicht uniforme Dichteverteilung führt zu nicht uniformen Verzerrungs-Spannungsfeldern bei einfachen Zugversuchen. Um die Materialkomplexität adäquat abbilden zu können, müssen Zwei-Skalen-Simulation eingesetzt werden, da nicht die gesamte Mikrostruktur der Verpackung aufgelöst werden kann. Die Mikrostruktur wird nur in sogenannten repräsentativen Volumenelementen (RVEs) aufgelöst. Für die Volumenelemente werden nichtlineare Elastizitätsprobleme für charakteristische Lastpfade numerisch gelöst. Danach liefert eine Mittelwertbildung der Lösungen effektive makroskopische Materialeigenschaften. Diese Methode wird oft als numerische Homogenisierung oder *Upscaling* bezeichnet. In der Zwei-Skalen-Simulation wird anstatt in

jedem makroskopischen Punkt analytische Materialgesetze zu spezifizieren und zu verwenden, eine numerische Homogenisierung der lokalen Mikrostruktur durchgeführt.

Durch die Homogenisierung der Mikrostruktur kann man die Steifigkeit und Festigkeit von stark heterogenen Materialien prognostizieren, wie z.B. Mauerstrukturen (Yuen & Kuang, 2013), Plattenkonstruktionen (Helfen & Diebels, 2014), Schichtverbundwerkstoffe (Li, et al., 2014), Nano-Verbundwerkstoffe (Liu, et al., 2011). Das Aufquellen der Holzfaser kann ebenfalls genauer mit einem Zwei-Skalen-Ansatz analysiert werden (Rafsanjani, et al., 2013). Um die Risse und die Schädigung eines Verbundwerkstoffs zu berechnen, kann man die FE<sup>2</sup> Methode anwenden (Feyel & Chaboche, 2000; Nguyen, et al., 2011; Visrolia & Meo, 2013). Allerdings ist diese Methode sehr rechenintensiv, weshalb es sich anbietet, einen analytischen Ansatz auf der Mikroskala zu nutzen (Salviato, et al., 2013), oder zunächst eine Modellreduktion durchzuführen (Somer, et al., 2014).

Um das Homogenisierungsproblem zu lösen, muss man wie oben erwähnt zunächst ein repräsentatives Volumenelement (RVE) mit der geometrischen Mikrostruktur im Computer generieren. Das Ergebnis sind Fasernetzwerkstrukturen wie z.B. in den Abbildungen 1 und 3. Wir nutzen einen Ansatz, der auf experimentell bestimmten stochastischen Mikrostrukturparametern wie z.B. Faserlängenverteilung, Faserdurchmesser und Faserorientierung basiert. Das Fasernetzwerk wird in 3 Schritten generiert. Im ersten Schritt wird durch ein zufälliger Faserablageprozess simuliert. Derartige stochastische Faserablageprozesse können auch mit Hilfe der Fokker-Planck-Gleichung modelliert werden (Götz, et al., 2007; Grothaus & Klar, 2008). Zur Diskretisierung der Fasernetzwerke werden regelmäßige Gitter (Voxelgitter) als Alternative zu Balken- oder Schalen-Elementen oder randangepassten finiten Elementen, die in anderen Arbeiten verwendet werden, vorgeschlagen.

Häufig sind Umformprozesse mit lokalen oder globalen Kompressionen der Fasernetzwerke verbunden. Bei der Kompression des Fasernetzwerks entstehen neue Kontaktstellen zwischen den Fasern und außerdem müssen große Verformungen und nichtlineare Schädigungseffekte des Materials beachtet werden. Zur numerischen Simulation dieser Deformationsvorgänge werden erste Modelle und Resultate vorgestellt. Das Kontaktproblem wird in einer vereinfachten Form gelöst, indem der leere Raum zwischen den Fasern durch ein Material mit einer sehr geringen Steifigkeit verglichen zur Fasersteifigkeit (Verhältnis bis zu  $10^5$ ) ersetzt wird. Dadurch wird das gegenseitige Durchdringen von Fasern ausgeschlossen. Dies kann als eine Regularisierung des nichtlinearen Elastizitätsproblems mit Kontakt betrachtet werden.

Es werden Voxel, die teilweise mit Zellulose gefüllt sind bzw. teilweise zum Porenraum gehören, eingeführt und als Mischvoxel bezeichnet, um die Lage der Faserränder präziser beschreiben zu können (Merkert, 2013). Im Allgemeinen ist ein Mischvoxel ein Voxel, in dem mehrere verschiedene Phasen bzw. Konstituenten vorhanden sind. Dabei muss die Summe der relativen Phasenanteile immer 1.0 sein.

Schließlich wird eine verbesserte Version des Zwei-Skalen-Modells vorgestellt. Die Nutzung einer Datenbank von bereits im Voraus analysierter Mikrostrukturen reduziert den Rechenaufwand wesentlich. Die Datenbank kann in jeder Iteration bzw. für jeden neuen Lastfall wieder verwendet werden. Auf der Mikroskala, d.h. für das Volumenelement mit dem Fasernetzwerk, wird ein neues transversal isotropes Schädigungsmodell mit 3 Variablen vorgeschlagen.

## 2. Mikrostrukturmodell

Ein RVE ist ein kleiner Ausschnitt der Gesamtstruktur, das die Eigenschaften der Mikrostruktur repräsentiert, welches allerdings groß genug gewählt werden muss, um die makroskopischen Materialeigenschaften genau genug zu approximieren.

Es werden 6 Mikrostrukturen mit unterschiedlicher Dichte bzw. Faserorientierung betrachtet, um den Einfluss der Dichte bzw. der Faserorientierung auf die effektive Steifigkeit zu analysieren. Die gewählten Eigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Hierbei ist die Anfangsdichte die Dichte, bevor das Fasernetzwerk komprimiert wurde. Die Dichte nach der Kompression ist die simulierte Dichte, die durch die Simulation einer Kompression erreicht wird. Dabei wird für die isotropen Strukturen eine 55% Komprimierung und für die anisotropen eine 45% Komprimierung in z-Richtung durchgeführt. Die Faserorientierung wird durch einen Tensor 2. Stufe  $a_{xy}$  beschrieben. Es wird ein Tensor mit 3 von Null verschiedenen Einträgen  $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ ,  $a_{zz}$  auf der Hauptdiagonale angesetzt. Die Anzahl der Voxel in x-, y- bzw. z-Richtung nach der Kompression wird  $N_x$ ,  $N_y$  bzw.  $N_z$  bezeichnet.

	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3	Struktur 4	Struktur 5	Struktur 6
Orientierung	Isotrop	Isotrop	Isotrop	Anisotrop	Anisotrop	Anisotrop
Anfangsdichte in kg/m <sup>3</sup>	350.904	345.773	334.106	381.771	377.759	378.684
Dichte nach Kompression in	633.938	628.616	595.225	706.093	669.446	694.144

kg/m <sup>3</sup>						
a <sub>xx</sub>	0.419311	0.426885	0.426079	0.256456	0.267861	0.276601
a <sub>yy</sub>	0.420339	0.425197	0.416038	0.600859	0.577055	0.580766
a <sub>zz</sub>	0.160349	0.147918	0.157883	0.142685	0.155083	0.142632
N <sub>x</sub>	190	190	190	190	190	190
N <sub>y</sub>	190	190	190	190	190	190
N <sub>z</sub>	71	76	86	57	61	56

**Tabelle 1: Mikrostrukturparameter**

Die Orientierungseigenschaften sind statistische Werte, die auf MDF-Platten zutreffen und durch CT-Scans und anschließender Bildverarbeitung statistisch ermittelt wurden (Sliseris, et al., 2014).

Das stochastische Fasernetzwerk wird durch einen Faserablagerungsprozess generiert. Dazu wurde die am Fraunhofer ITWM entwickelte Software GeoDict® (GeoDict, 2014) eingesetzt. Dabei werden Zellulosefasern als elliptische Hohlfasern mit einer Zellwanddicke von 4 µm modelliert. Das Verhältnis der dicksten zur dünnsten Faser beträgt 2. Die Anfangsdichten, die durch diesen Ablageprozess entstehen, sind in Tabelle 1 zu finden. Damit die gewünschten Dichten des Kartonmaterials erreicht werden, wird das Fasernetzwerk in einer Simulation virtuell komprimiert.

Durch die Kompression ändern sich auch die Orientierungswinkel (d.h. die Richtung der Längsachse) der Fasern und die Ausrichtung in der Ebene senkrecht zur Kompressionsrichtung nimmt zu. Die Orientierungswinkel der Fasern werden nach der Komprimierung neu berechnet. Da die Faserzellwände transversal isotrop sind, werden nur 2 Winkel benötigt.

Die mechanischen Eigenschaften der Faserzellwände werden wie folgt spezifiziert:

Elastizitätsmodul  $E_x=50$  GPa,  $E_y=3$  GPa, Poissonzahl  $\nu_{xy}=\nu_{xz}=0.3$  und Schubmodul  $G_{yz}=3$  GPa (Persson, 2000). Der leere Raum wird durch ein linear elastisches, isotropes Material mit E-Modul  $E=0.1$  GPa und Schubmodul  $\nu=0.01$  simuliert.

Für die Berechnung der effektiven Elastizitätskoeffizienten werden 6 periodische Randwertprobleme (Zug/Druck und Schub in jeweils 3 orthogonale Richtungen) für die Gleichungen der linearen Elastizität in den RVEs als Berechnungsgebiet formuliert und

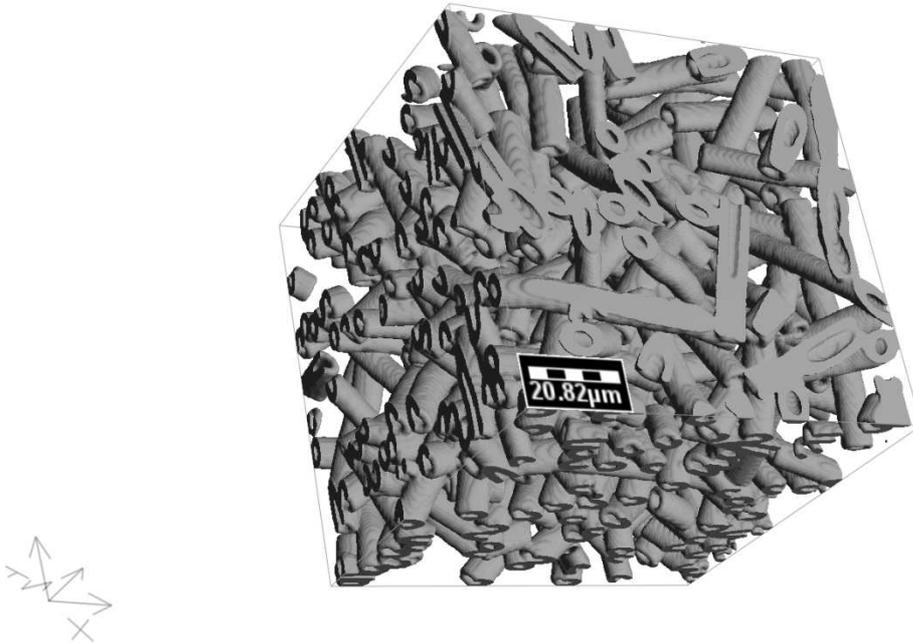
gelöst. Für die Berechnung der nichtlinearen mechanischen Eigenschaften (bei Zugbeanspruchung in  $y$ -Richtung) wird ebenfalls das periodische Randwertproblem für die nichtlinearen Elastizitätsgleichungen mit Schädigung und Elastoplastizität gelöst. Im letzten Fall wird die Last inkrementell aufgebracht. Im linearen und nichtlinearen Fall werden die partiellen Differentialgleichungen nicht direkt gelöst, sondern in äquivalente Integralgleichungen vom Lippmann-Schwinger-Typ umgeformt. Die Integralgleichungen werden iterativ gelöst, wobei das Materialgesetz im realen Raum und die Kernfunktion (eine spezielle Greensche Funktion) im Fourier-Raum angewandt werden. Dies führt auf ein sehr effizientes Lösungsverfahren, wenn die Fourier-Transformation mit Hilfe des FFT-Algorithmus ausgeführt wird. Die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt erläutert.

### 3. Resultate

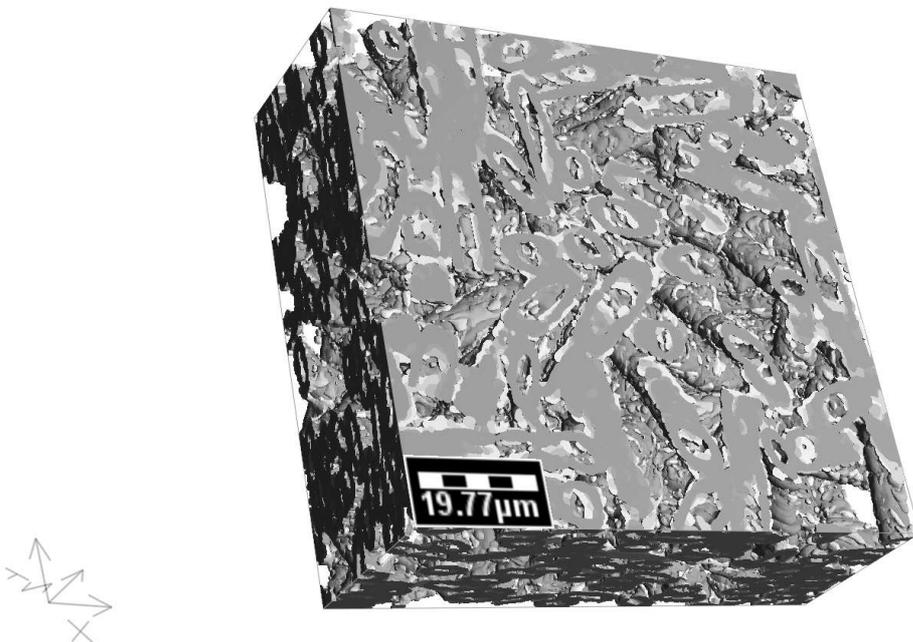
Als Lösung der periodischen Randwertprobleme werden das Verzerrungsfeld und die Spannungsverteilung im Volumenelement erhalten. Dazu ist in Abb. 5 die Vergleichsspannung nach von Mises für eine Schnittfläche visualisiert. Das Energieäquivalenz-Prinzip wird danach eingesetzt, um aus den berechneten lokalen Spannungen und Verzerrungen den effektiven makroskopischen Steifigkeitstensor 4. Ordnung zu berechnen. Es ergibt sich dabei i. Allg. ein anisotroper Tensor mit 21 unabhängigen Elastizitätskonstanten. Bei den in dieser Arbeit betrachteten 6 Strukturen wird jedoch näherungsweise ein orthotroper Steifigkeitstensor berechnet, in dem nur noch 9 unabhängige Elastizitätskoeffizienten vorkommen. Diese Elastizitätskoeffizienten wurden für die komprimierten Strukturen in die entsprechenden Ingenieurkonstanten umgerechnet und sind in Tabelle 2 angegeben. Durch den Faserablageprozess und insbesondere durch die Kompression sind fast alle Fasern in die  $x$ - $y$ -Ebene ausgerichtet. Deshalb ist der berechnete E-Modul  $E_z$  viel kleiner als  $E_x$  und  $E_y$  bei allen Strukturen. Bei den Strukturen 4 (siehe Abb. 3 und 4), 5, und 6 sind die Fasern stärker in  $y$ -Richtung als in  $x$ -Richtung ausgerichtet. Der berechnete E-Modul  $E_y$  ist deshalb fast dreimal größer als der E-Modul  $E_x$ .

Die Struktur 3 besitzt eine kleinere Dichte als die Strukturen 1 und 2. Die Elastizitätskoeffizienten von Struktur 3 sind auch kleiner als die der Strukturen 1 und 2 mit Ausnahme des Schubmoduls  $G_{xy}$ , der ungefähr gleich groß wie bei den Strukturen 1 und 2 ist. Die komprimierten Strukturen 1 (Abb. 2) und 2 besitzen die fast gleichen Mikrostruktureigenschaften (siehe Tabelle 1). Für diese Strukturen stimmen alle 9 berechneten Elastizitätskoeffizienten näherungsweise überein (siehe Tabelle 2). Die analoge Aussage trifft auf die komprimierten anisotropen Strukturen 4 (Abb. 4), 5 und 6 zu. Praktisch müssen immer mehrere Realisierungen mit den gleichen stochastischen

Mikrostrukturparametern berechnet werden. Wenn die Abweichungen zu stark zwischen den Realisierungen sind, müssen die Volumenelemente vergrößert werden.

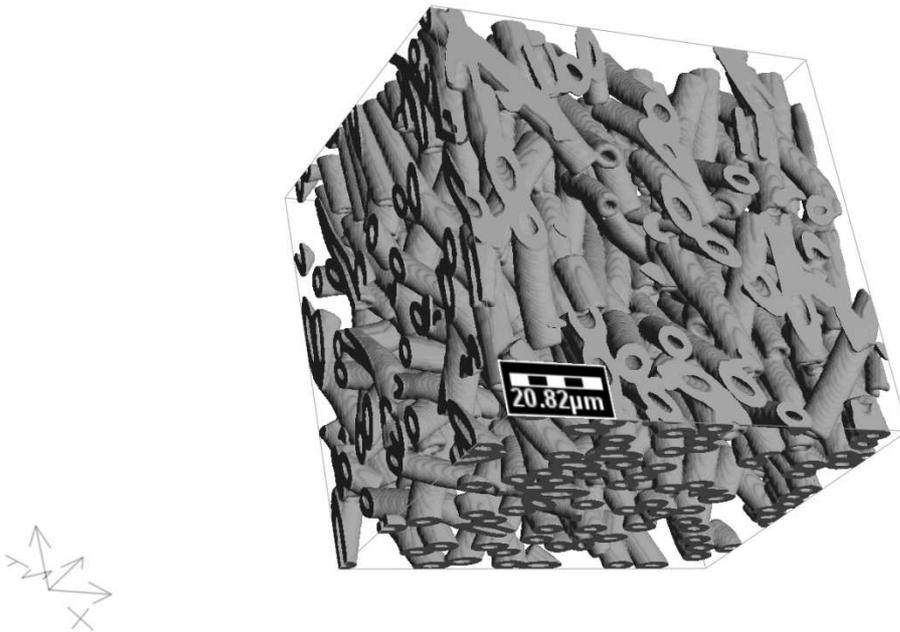


**Abbildung 1: Struktur 1 vor Komprimierung**

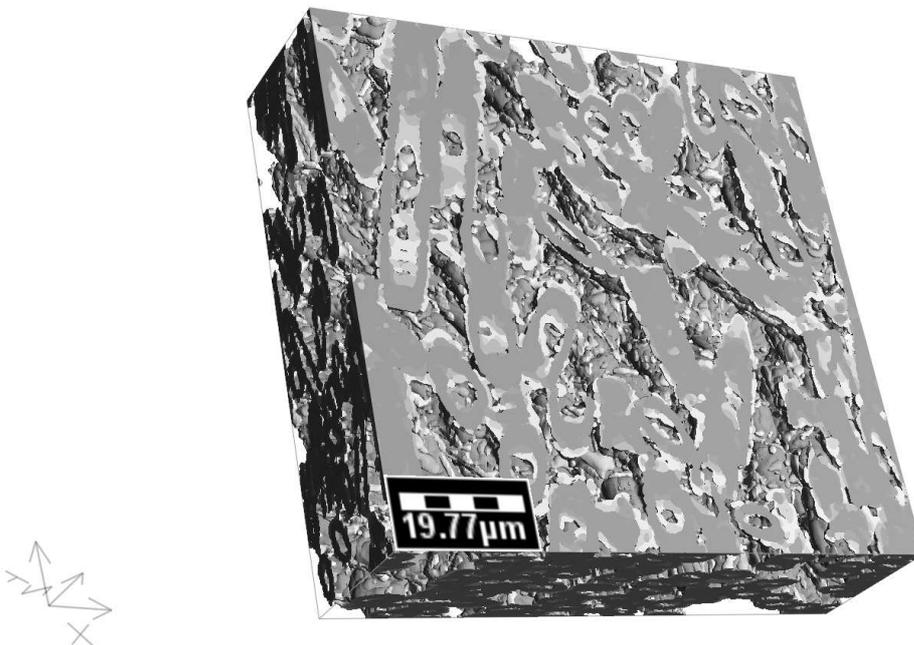


**Abbildung 2: Struktur 1 nach Komprimierung**

Die Graustufen im komprimierten Bild stellen den Faservolumenanteil im Mischvoxel dar. Je dunkler die Graustufe, desto höher ist der Faseranteil im Voxel.



**Abbildung 3: Struktur 4 vor Komprimierung**

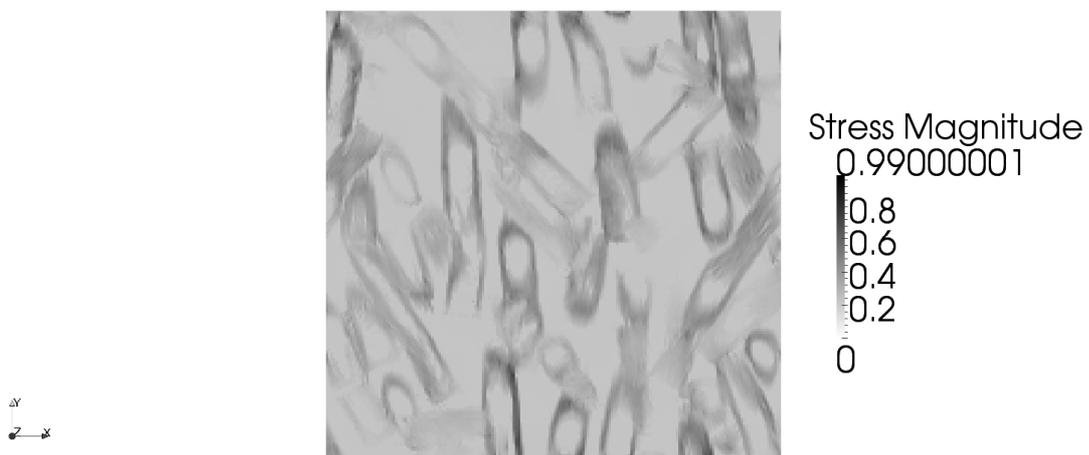


**Abbildung 4: Struktur 4 nach Komprimierung**

Die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Strukturen nach der Komprimierung kann man in Tabelle 2 sehen. In Abbildung 5 kann man den Betrag der Spannung in der mittleren Ebene von Struktur 6 nach Kompression.

	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3	Struktur 4	Struktur 5	Struktur 6
$E_x$ / GPa	2.965	3.079	2.579	2.134	2.091	2.331
$E_y$ / GPa	3.011	2.890	2.415	6.042	5.258	5.900
$E_z$ / GPa	0.743	0.763	0.670	0.978	0.854	0.907
$G_{yz}$ / GPa	0.503	0.480	0.432	0.722	0.666	0.706
$G_{xz}$ / GPa	0.512	0.515	0.449	0.524	0.449	0.519
$G_{xy}$ / GPa	1.259	1.090	1.100	1.349	1.139	1.254
$\nu_{yz}$	0.252	0.271	0.247	0.282	0.332	0.338
$\nu_{xz}$	0.280	0.288	0.254	0.246	0.227	0.267
$\nu_{xy}$	0.241	0.233	0.265	0.135	0.124	0.116

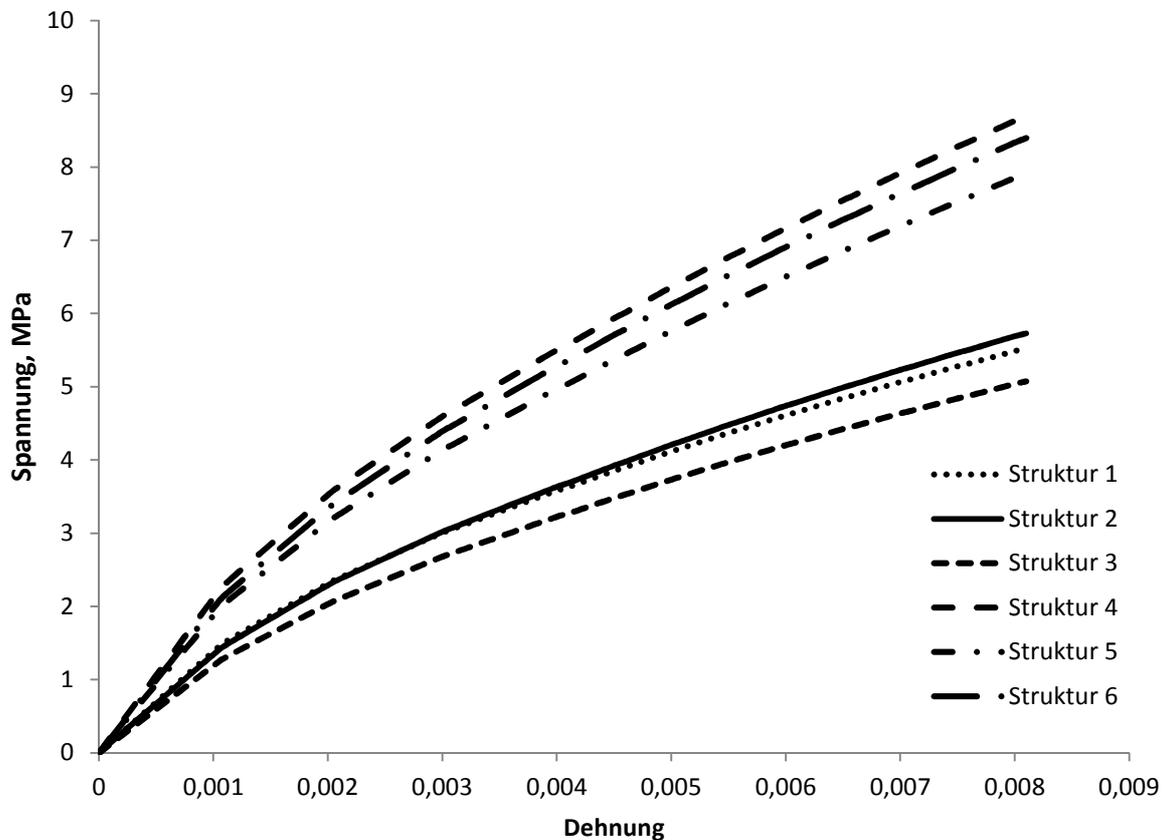
**Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften nach der Komprimierung**



**Abbildung 5: Misessche Vergleichsspannung von Struktur 6 in der mittleren Ebene**

Werden die Mikrostrukturen auf Zug bis in den nichtlinearen Bereich, in dem Effekte wie plastisches Fließen und Schädigung auftreten, belastet, so ergibt sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Abbildung 6. Die Zugbelastung ist im Fall von ausgerichteten

Fasern in die Richtung ( $y$ -Richtung), in die die Fasern ausgerichtet sind. Im Falle von ausgerichteten Fasern (Strukturen 5 und 6) ist die Spannung im Material bei gleicher Dehnung größer. Die Steifigkeit  $E_y$  ist wesentlich größer.



**Abbildung 6: Spannungs-Dehnungsdiagramm für orientierte und nicht orientierte Fasernetzwerke**

#### 4. Zusammenfassung

Im Gegensatz zu phänomenologischen makroskopischen Modellen kann mit Hilfe der entwickelten schnellen Lösungsverfahren zur Mikrostruktursimulation der qualitative und quantitative Einfluss von Fasereigenschaften und morphologischen Eigenschaften auf die effektiven makroskopischen mechanischen Materialeigenschaften analysiert werden. Im Rahmen einer Zwei-Skalen-Simulation dient die Mikrostruktursimulation zur Vorhersage der Querkzugfestigkeit, Biegesteifigkeit und Biegefestigkeit (Sliseris, et al., 2014). Das anisotrope Materialverhalten wird vollständig erfasst. Die Methode kann zur Optimierung von Herstellungsprozessschritten für Verpackungsmaterial und der Eigenschaften des Verpackungsmaterials eingesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- Eichhorn, S. & Young, R., 2003. Deformation micromechanics of natural cellulose fibre networks and composites. *Composites Science and Technology*, Band 63, pp. 1225-1230.
- Feyel, F. & Chaboche, J.-L., 2000. Fe2 multiscale approach for modelling the elastoviscoplastic behaviour of long fibre SiC/Ti composite materials. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Band 183, pp. 309-330.
- GeoDict, 2014. [www.geodict.de](http://www.geodict.de)
- Götz, T., Klar, A., Marheineke, N. & Wegener, R., 2007. A stochastic model and associated Focke-Planck equation for the fiber lay-down process in nonwoven production processes. *SIAM J. Applied Mathematics*, Band 67, pp. 1704-1717.
- Grothaus, M. & Klar, A., 2008. Ergodicity and rate of convergence for a non-sectorial fiber lay-down process. *SIAM J. Mathematical Analysis*, Band 40, pp. 968-983.
- Helfen, C. E. & Diebels, S., 2014. Computational homogenisation of composite plates: Consideration of the thickness change with a modified projection strategy. *Comput. Math. Appl.*, Band 67, pp. 1116-1129.
- Heyden, S., 2000. *Network modelling for the evaluation of mechanical properties of cellulose fibre fluff*, Lund University: LTH, Division of Structural Mechanics.
- Li, H., Wang, W. & Matsubara, T., 2014. Multiscale analysis of damage progression in newly designed UACS laminates. *Appl. Sci. Manuf.*, Band 57, pp. 108-117.
- Liu, J., Chen, Z., Wang, H. & Li, K., 2011. Elasto-plastic analysis of influences of bond deformability on the mechanical behavior of fiber networks. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Band 55, pp. 131-139.
- Liu, Wang, K. & Bakis, C. E., 2011. Effect of functionalization of single-wall carbon nanotubes (SWNTs) on the damping characteristics of SWNT-based epoxy composites via multiscale analysis. *Appl. Sci Manuf*, Band 42, pp. 1748-1755.
- Merkert, D., 2013. *Voxel-based fast solution of the Lippmann-Schwinger equation with smooth material interfaces*, Masterarbeit, Fachbereich Mathematik, TU Kaiserslautern
- Nguyen, V. P., Lloberas-Valls, O., Stroeven, M. & Sluys, L. J., 2011. Homogenization-based multiscale crack modelling; From microdiffusive damage to macro-cracks. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Band 200, pp. 1220-1236.
- Persson, K., 2000. *Micromechanical Modeling of Wood and Fiber Properties (Ph.D. thesis)*, Lund University: Department of Mechanics and Materials.

- Rafsanjani, A. et al., 2013. Multiscale analysis of free swelling of norway spruce. *Appl. Sci. Manuf.*, Band 54, pp. 70-78.
- Salviato, M., Zappalorto, M. & Quaresimin, M., 2013. Plastic shear bands and fracture toughness improvements of nanoparticle filled polymers: A multiscale analytical model. *Appl. Sci. Manuf.*, Band 48, pp. 144-152.
- Sliseris, J. et al., 2014. Numerical prediction of the stiffness and strength of medium density fiberboards. *Mechanics of Materials*, Band 79, pp. 73-84.
- Sliseris, J. & Rocens, K., 2010. Curvature analysis for composite with orthogonal asymmetrical multilayer structure. *J. Civ. Eng. Manage*, Band 16, pp. 242-248.
- Sliseris, J. & Rocens, K., 2013a. Optimal design of composite plates with discrete variable stiffness. *Compos. Struct.*, Band 98, pp. 15-23.
- Sliseris, J. & Rocens, K., 2013b. Optimization of multispan ribbed plywood plate macrostructure for multiple load cases. *J. Civ. Eng. Manage*, Band 19, pp. 696-704.
- Somer, D., Perić, D., deSouzaNeto, E. & Dettmer, W., 2014. On the characterisation of elastic properties of long fibre composites using computational homogenisation. *Comput. Mater. Sci*, Band 83, pp. 149-157.
- Stoeckel, F., Konnerth, J. & Altmutter, W., 2013. Mechanical properties of adhesives for bonding wood a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives* , Band 45, pp. 32-41.
- Visrolia, A. & Meo, M., 2013. Multiscale damage modelling of 3d weave composite by asymptotic homogenisation. *Compos. Struct*, Band 95, pp. 105-113.
- Wilbrink, D., Beex, L. & Peerlings, R., 2013. A discrete network model for bond failure and frictional sliding in fibrous materials. *International journal of Solids and Structures* , Band 50, pp. 1354-1363.
- Yuen, Y. & Kuang, J., 2013. Fourier-based incremental homogenisation of coupled unilateral damage-plasticity model for masonry structures. *Int. J. Solids Struct.*, Band 50, pp. 3361-3374.