

Rechenanalyse von Gewebeverbundwerkstoffen: Einzel- und Mehrzweckoptimierung sowie Analyse der Empfindlichkeit von Mesoskaligen Strukturen

DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieur
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus Universität Weimar

vorgelegt von

Ilyani Akmar ABU BAKAR
(externe Doktorandin)

aus

Kuala Lumpur, Malaysia

Mentor (Betreuer): Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk

Weimar, Dezember 2018

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. In den letzten Jahren wuchs das Interesse an textilen Verbundwerkstoffe in zahlreichen Anwendungen, was auch zahlreiche Untersuchungen bez. deren Zuverlässigkeit nach sich zog. Die vorliegende Dissertation befasst sich mit drei wichtigen Fragestellungen: a) Einzelzieloptimierung, b) Sensitivitätsanalyse und c) Multizieloptimierung für Gewebestrukturen, insbesondere gewebte textile Verbundwerkstoffe.
2. Verschrägungen oder Fehlausrichtungen von Garnwinkeln in Kett- und Schussrichtungen, die eigentlich gerade laufen, entstehen durch Textilscheren während der Entspannungsphasen. Nur wenige Forschungsarbeiten berichten von Verschrägungen in Textilgeweben, die komplexe Gewebestrukturen als Gewebestrukturvariablen betrachten. Für die Einzelzieloptimierung ist es wichtig, die elastischen Eigenschaften solcher geplanter komplexer Gewebestrukturen auf Einheitszellenbasis zu optimieren, die auf periodischen Grenzbedingungen beruhen.
3. Es gibt eine beträchtliche Anzahl von deterministischen mesoskaligen Modellen gewebter Textilkompositen. Es gibt allerdings vergleichsweise wenige Untersuchungen zu komplexen Gewebestrukturen unter Unsicherheitsbedingungen. Während die meisten Modelle in früheren Studien sich mit einem System von Matrix und Garnen beschäftigen, müssen sich stattdessen die Designer in vielen Situationen mit trockenem Textilgut befassen. Trockene Textilien beziehen sich auf Faserbündel ohne verbindende Matrix, die sie zusammenhalten. Das zweite Aufgabenziel ist, es für trockenes Textilgut eine Unsicherheitsanalyse durchzuführen, um herauszufinden, wie ausgewählte Eingangsparameter makroskopische Materialeigenschaften beeinflussen.
4. Obwohl viele Studien zur Optimierung von gewebten Textilkompositen vorliegen, gibt es wenige Untersuchungen zu komplexen gewebten Textilstruktur. Angesichts dessen wird ein hierarchisch stochastischer mehrskaliger Optimierungsansatz präsentiert (fein- und grobskalige Optimierungen) zum Design neuer textiler Verbundwerkstoffe. Die feinskalige Optimierung muss das jeweils beste einlagige RVE- (=Repräsentative Volumenelement) Muster finden, das seine makroskopischen elastischen Eigenschaften maximiert. Dazu soll ein evolutionärer Algorithmus (EA) verwendet werden. Die grobskalige Optimierung soll die Stapelsequenzen unter unsicheren mesoskopischen Parametern optimieren. Hierfür soll ein Ameisen Algorithmus (ACO) angewandt werden. Die Zielfunktionen der grobskaligen Optimierung bestehen darin, die Kosten und das Gewicht der hybrid laminierten Kompositplatten zu verringern, unter Zwangsbedingungen für die Eigenfrequenzen und Knicklast.

Stand der Wissenschaft

5. Die elastischen Eigenschaften von gewebten Textilkompositen sind verschiedenen Faktoren ausgesetzt, unter anderem den Faser- und Matriceigenschaften, der Gewebestruktur und den relativen und totalen Faservolumenanteilen. Die Herstellung und die Eigenschaften des Textilmaterials sind von (Hearle *et al.*, 1972) überprüft worden. Das Gewebematerial hat unsicherere mechanische Eigenheiten im Vergleich zu konventionell strukturiertem Material. Einige Fasern werden von Umweltfaktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit beeinträchtigt. Darüber hinaus reduzieren Alterungsfaktor die Fasersteifigkeit (Buckley, 1980). Obgleich es zahlreiche Gewebemodelle gibt, fehlt ein genereller Ansatz für derartige Materialien, welcher das Gewebemuster als Parameter behandelt (Lomov *et al.*, 2001).
6. Unsicherheitsanalysen an mechanischen Modellen, welche die Feinskalenstruktur des Verbundwerkstoffes modellieren, sind aufgrund der hohen Rechenzeit sehr aufwändig. Deshalb wurden Homogenisierungsmethode entwickelt, welche die globale Antwort voraussagen können und gleichzeitig den Rechenaufwand stark reduzieren. Eine der gängigsten Verfahren sind sog. RVE-basierte Homogenisierungs-

ansätze auf Grundlage der FEM. Einige der frühesten Studien von Clulow und Tayler wurden bereits 1963 durchgeführt. Gasser *et al.* (2000) schlug einen Ansatz für trockenes Gewebe vor.

7. Hybridkomposite können die mechanischen Eigenschaften von textilen Verbundwerkstoffen drastisch verbessern. Hierbei ist keine hohe Steifheit in jeder Laminatschicht erforderlich. Bei Hybridkompositen überträgt jede Struktur ihre Eigenschaften auf eine andere Strukturen, welches letztendlich zu einer optimalen Gesamtsteifigkeit beiträgt (Fangueiro und Soutinho, 2011). Zur Optimierung derartiger Materialien wurden in der Vergangenheit einige Optimierungstudien durchgeführt, meist basierend auf meta-heuristische Algorithmen wie zum Beispiel genetische Algorithmen (siehe Tahani *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2004; Grosset *et al.*, 2001), neuro-GA-basierte Algorithmen (Ghasemi und Ehsani, 2007), Scattersuchalgorithmen (Rao und Lakshmi, 2009; Nebro *et al.*, 2008) sowie Ameisenalgorithmen (ACO) (Hemmatian *et al.*, 2013). Die meisten Studien beschränken sich jedoch auf Optimierungsansätzen auf einzelne Längenskalen. Eine Optimierung über mehrere Längenskalen, welche für das Design neuer Gewebestrukturen notwendig ist, wurde bislang nicht durchgeführt.

Eingesetzte Methoden und Lösungsweg

8. Für die Einzelzieloptimierung werden Evolutionsalgorithmen (EA) verwendet. Ziel ist die Maximierung verschiedener Steifigkeiten in Abhängigkeit unterschiedlicher Gewebestrukturen. Die Vorauswahl der Gewebestrukturen erfolgt nach ästhetischen Gesichtspunkten, d.h. aus populären Mustern. Die Gewebemodelle werden von mit Hilfe der Software TexGen generiert und die FE-Studien an RVEs erfolgen mit dem kommerziellen Rechenprogramm ABAQUS. Hierfür sind periodische Randbedingungen im Rahmen eines Pythonskriptes zu implementieren. Die Länge der Zwischenräume, die Dicke des Garns und die Bündelgrößen, die Wirkung des Formfaktors und die Materialkonstituenten sind ebenfalls in einem parametrisierten Modell mit Hilfe der Software Python zu implementieren.
9. Für die Unsicherheitsanalyse kommen zwei globale Sensitivitätsanalysen zum Einsatz, welche die makroskopischen Steifigkeiten in Abhängigkeit unsicherer mesoskopischer Eingangsparameter quantifizieren sollen. Die untersuchten mesoskaligen Unsicherheiten sind die Garnhöhe, der Fadenführungsabstand, die Garnbreite und der Reibungskoeffizient. Eine regressionsbasierte Unsicherheitsanalyse (der Pearson Koeffizient), die varianzbasierte Unsicherheitsanalyse (Response Surface Model, =Oberflächenreaktionsmodell) und die Sobol Indizes werden verwendet, um Einflüsse jeder Variablen auf die makroskopisch elastischen Schubmodule zu quantifizieren. Es wird angenommen, dass das trockene Gewebe sich transvers isotropisch auf die Makroskala auswirkt. Die trocken gewebten Textilien sind aus purem E-Glass und Polypropylen gemacht. Latin Hypercube Sampling (LHS) wird für stochastische Untersuchungen benutzt. Es wird eine Gleichverteilung vorausgesetzt.
10. Zur stochastischen Multizieloptimierung wird ein metaheuristische Ansatz (EA und ACO) verwendet. Das feinskalige Optimierungsproblem konzentriert sich auf ein Laminat, welches in einer Matrix eingelagert ist. Die Webstruktur ist die Designvariable und es werden vier ungewisse mesoskopische Parameter untersucht: der Fadenführungsabstand, die Garnweite, die Garnhöhe und der Garnversatzwinkel. Das Laminat wird wie zuvor in Tex-Gen modelliert und von ABAQUS unter periodischen Randbedingungen analysiert; die stochastische Analyse erfolgt mit Hilfe eines LHS. Die makroskopischen Elastizitätseigenschaften werden unter uniaxialer Spannung extrahiert. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt durch die hohe Rechenzeit des mechanischen FE Modells an einem Ersatzmodell, i.e. Regressionsmodell. Bei der grobskaligen Optimierung werden mehrlagige, faserverstärkte und hybrid laminierte Verbundwerkstoffe betrachtet. Die Optimierung erfolgt basierend auf den makroskopisch

elastischen Eigenschaften des einlagigem RVE-Modells aus der feinskaligen Optimierung. Das untersuchte einlagige RVE besteht aus Aluminiumoxyd- ($Al_2O_3 - Al$) und Silikoncarbidaluminiumschichten ($SiC - Al$). Die grobskalige Optimierung wird nur für eine ausgewählte Anzahl an Unsicherheiten, i.e. die unsichersten Eingangsparameter der Feinskalenoptimierung. Unsichere mesoskopische Parameter, die kaum Einfluss auf makroskopisch elastische Eigenschaften haben, werden als deterministisch angenommen. Die Ameisen Algorithmen Optimierung (ACO) wird genutzt, um die besten hybrid laminierten Komposite zu finden, indem eine konvexe Kombination von den zwei nichtlinearen Zielen, Gewicht (G) und Kosten (K) optimiert wird, die auf einer Reihe von Grenzwertmultiplikatoren (α) basiert. Zwangsbedingungen beziehen sich auf Eigenfrequenz und Knicklast.

Wesentliche Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studie können folgendermaßen zusammengefasst werden:

11. Die Tendenz zum Ausfransen hängt vom Verhalten der Webfäden ab, was mit dem Webfaktor zusammenhängt. Die Einzeloptimierung identifiziert das sog. *MataBerkait* als 'besten' Verbundwerkstoff. Es hat nicht nur eine hohe Elastizität sondern aufgrund einer hohen Webfestigkeit auch eine minimale Tendenz zum Ausfransen.
12. Die regressionsbasierte Unsicherheitsanalyse identifiziert den Friktionskoeffizient und die Garnhöhe als wesentlichste Faktoren, welche die elastischen Eigenschaften von trockenem *MataBerkait* beeinflussen. Das Korrelationsverhältnis, das vonseiten dieser beiden Faktoren ausgeht ist extrem hoch (mehr als 0,90) in beiden evaluierten Belastungsfällen. Schubmodule haben nachweislich die schwächste Korrelation. Ebenso wurde festgestellt, dass der Abstand und die Weite des Garns den Elastizitätsmodul beeinflussen. Der Einfluss der Garnweite ist in allen Fällen marginal.
13. Das ausgewählte Material und die Lagenzahl haben den höchsten Einfluss auf die Kosten des optimierten hybrid laminierten Verbundwerkstoffes. Die Lagenwinkel und ihre Ausrichtungsfehler beeinflussen signifikant die Eigenfrequenz und die Kosten (C). Die Werte des Multiplikators α - spielen auch eine wichtige Rolle bei der Optimierung von hybrid laminierten Stapelfolgen. Wird α - zu 0 gesetzt, reduziert sich die Mehrfachzieloptimierungsformel auf eine Einzeloptimierung, welche die Kosten C minimiert. Ist α - gleich 1 wird das Gewicht optimiert. Werden nur die Kosten minimiert, besteht der Verbundwerkstoff ausschliesslich aus Aluminiumoxid ($Al_2O_3 - Al$).