

Kurzfassung

Pflanzenfaserverstärkte Kompositwerkstoffe (Biokomposite) stellen erneuerbare und leichtgewichtige Alternativen für das Bauwesen dar und können dazu beitragen, materialbezogene CO₂-Emissionen zu reduzieren. Ihr Einsatz in tragenden Strukturen ist jedoch nach wie vor begrenzt. Gründe dafür sind unter anderem die starke Streuung der Eigenschaften der Einzelbestandteile, Herausforderungen im Faser-Matrix-Verbund, die große Bandbreite an Kombinationsmöglichkeiten sowie das Fehlen harmonisierter Prüfverfahren und Bemessungsrichtlinien. Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit zwei miteinander verknüpfte Ziele: (i) die Entwicklung numerischer Modelle zur verlässlichen Prognose von Steifigkeit, Festigkeit und Materialversagen und (ii) die Einbindung dieses Wissens in frühe Entwurfsworkflows, die fachspezifische Hürden für Architekt:innen und Ingenieur:innen abbauen sollen.

Zur Beschreibung der gekoppelten Versagensmechanismen in Biokompositen werden nicht-lineare Finite-Elemente-Modelle auf mehreren Skalen entwickelt. Eine Einheitszelle mit zwei Fasern bildet Matrixschwächung, Verbundversagen und Faserbruch ab, reproduziert nichtlineares Verhalten aus Literaturquellen und ermöglicht es, das Zusammenwirken der einzelnen Schädigungsmechanismen im Detail zu untersuchen. Sensitivitätsanalysen zeigen die zentrale Bedeutung des Faser-Matrix-Verbunds und führen damit zu einer zweiten Studie, in der Microdroplet-Tests für weite Bereiche geometrischer und mechanischer Parameter numerisch simuliert werden. Ein künstliches neuronales Netz dient als Surrogatmodell, bildet vollständige Last-Verschiebungs-Kurven ab und ermöglicht effiziente Parameterstudien. Auf dieser Basis werden Traktions-Separations-Parameter für den Verbund identifiziert, die sich von Mikro- auf Meso-Skalen übertragen lassen (gezeigt für Flachs-Polypropylen-Komposite).

Ein Entwurf-zu-Analyse-Framework verbindet 3D-Stifteingaben am Tablet bis hin zu berechenbaren Modellen und koppelt diese mit einem Kontinuum-Mikromechanik-Modul, welches elastische Steifigkeiten und elastische Festigkeits-Grenzwerte für unterschiedliche Biokomposite und Mikrostrukturen (z. B. Faserorientierung und Faservolumenanteil) bereitstellt und damit in frühen Entwurfsiterationen schnelles Feedback liefert. Der Workflow wird später auf Extended Reality erweitert und durch haptisches Feedback ergänzt: Ein kollaborativer Roboter mit einer berührbaren Kontaktplatte stellt lokale Steifigkeitsantworten bereit, sodass Nutzer:innen Unterschiede zwischen Material- und Strukturvarianten physisch wahrnehmen können. Durch die Kopplung haptischer und visueller Rückmeldungen verbessert das System die Vermittlung struktureller Leistungsfähigkeit und senkt die Barrieren für den Einsatz neuartiger Materialien.

Im Rahmen der Prozesskette vom Material zur Tragstruktur adressieren diese Beiträge insbesondere zwei Aspekte: die verlässliche mechanische Beschreibung von Biokompositen und die Unterstützung früher, materialinformierter Entwurfsentscheidungen.

Abstract

Plant fiber-reinforced polymer composites (biocomposites) offer renewable, lightweight alternatives for the built environment and can help reduce embodied carbon. Their structural adoption, however, remains limited by a combination of factors, including variability in constituent properties, fiber-matrix adhesion challenges, the breadth of possible material architectures, and a scarcity of harmonized test methods and structural design guidelines. In this context, this thesis addresses two complementary needs: (i) predictive, numerical modeling of stiffness, strength, and failure, and (ii) integration of such knowledge into early design tools that lower knowledge barriers for architects and engineers.

Nonlinear finite element models at various scales are developed to capture the coupled failure mechanisms of biocomposites. A two-fiber unit cell incorporates matrix softening, interface failure, and fiber rupture, reproducing nonlinear responses reported in the literature and resolving interactions among damage mechanisms. Sensitivity studies highlight the decisive role of interface behavior, motivating a second study in which microdroplet tests are simulated across wide ranges of geometric/mechanical parameters. A neural-network surrogate reproduces full load-displacement curves and enables efficient parameter studies, yielding traction-separation parameters for the interface that transfer from micro- to mesoscale (demonstrated for a flax-polypropylene composite).

A sketch-to-analysis framework connects stylus-based 3D input to analysis-ready models and couples it with a micromechanics module that supplies elastic stiffness and limits for varied biocomposite materials and microstructures (e.g., fiber orientation and volume fraction), providing immediate feedback in early iterations. The workflow is expanded to extended reality, and complemented by haptic feedback: a collaborative robot with a touchable plate prop provides local stiffness responses so users can physically sense differences among material/structural choices. By coupling haptic and visual feedback, the system enhances communication of structural performance and lowers the knowledge barriers for engaging with novel materials.

Within the broader materials-to-structures process chain, these contributions address a subset of issues—predictive mechanics and support for early, material-informed design decisions—to aid credible consideration of biocomposites in structural applications.