HOCHVARIABLE VERBUNDWERKSTOFFE IN DER NATUR AM BEISPIEL DER ARTHROPODENKUTIKULA

Isabell Weich [1], Christian Weber [1], Antonia B. Kesel [2], Horst Werner [1]
Universität des Saarlandes, [1] Konstruktionstechnik/CAD, [2] Institut für Zoologie, Technische Biologie und Bionik

Zusammenfassung

Die Kutikula, das Außenskelett der Arthropoden (Krebse, Spinnen, Insekten), ist ein sehr komplexer Faser-Verbund-Werkstoff (FVW). Die Vielzahl an Variationsmöglichkeiten, die ein FVW bietet, werden hier auf vielfältige Weise genutzt. Dies ermöglicht es, mit relativ wenigen Grundbausteinen eine Vielzahl von Anforderungen zu erfüllen. In der vorliegenden Studie wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) Verformungsanalysen durchgeführt. Es zeigt sich, daß bereits die Änderung eines einzelnen Parameters, hier der Faserorientierung, die mechanischen Eigenschaften bei verschiedenen Lastfällen stark beeinflußt. Die darüber hinaus vorgenommenen Strukturvariationen weisen auf eine Mehrkriterienoptimierung hin.

1 Allgemeine Einführung

Faser-Verbund-Werkstoffe sind in der Natur stark vertreten, da hier effizienter Materialeinsatz und Leichtbau wichtige Kriterien sind. Die Arthropoden sind der bei weitem vorherrschende Tierstamm auf der Erde. Dies drückt sich sowohl in der Arten- als auch in der Individuen- und Formenvielfalt aus. Sie stellen mit etwa 1 Million verschiedener Arten ca. drei Viertel der bekannten Tierarten (z.B. [13]). Die allen Arthropoden als „Lösungskonzept“ gemeinsame Kutikula, das Außenskelett, hat wesentlichen Anteil an diesem enormen evolutiven Erfolg und der Eroberung aller Lebensräume. Es handelt sich bei der Kutikula nicht um ein homogenes Abscheidungsprodukt, sondern sie besitzt, chemisch gesehen, eine äußerst komplexe hochvariable Zusammensetzung bestehend aus Chitin, Proteinen, Lipiden und diversen Einlagerungen. Biomechanisch kann sie vereinfacht als Faserverbundwerkstoff mit stark positions- und funktionsabhängigem Aufbau angesehen werden, der in bezug auf das mechanische Verhalten vergleichbar mit Faser-Verbund-Kunststoffen (FVK) ist [2]. Diese Prämisse ermöglicht, zumindest für erste Untersuchungen, die Anwendung der in der Technik bekannten Variationsparameter von FVK auf den natürlichen Verbundwerkstoff Arthropodenkutikula.

- Eigenschaften der Einzelkomponenten
- Faserorientierung (Bild 1)
- Faservolumengehalt
- Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten
- Schichtdicke und Schichtanordnung

Diese Parameter beeinflussen die mechanischen Eigenschaften wie Elastizitätsmodul (E-Modul), Schubmodul (G-Modul), Querkontraktionszahl ν. Die Vielzahl von Variationsmöglichkeiten des Werkstoffs erschließt eine schier endlose Palette mechanischer Eigenschaften und Funktionen, die von sehr harten Beißwerkzeugen über flexible Gelenke bis zu filigranen Flügelmembranen reicht.

2 Gliederung und Aufbau der Arthropodenkutikula

Die Kutikula bedeckt die gesamte Körperoberfläche und bildet außerdem das Atemröhrensystem, die Tracheen. Sie erfüllt die verschiedensten Aufgaben: Formgebung, Ansatzpunkte für Muskulatur, Schutz vor chemischen und mechanischen Schadwirkungen, Schutz vor Austrocknung, Verhinderung des Eindringens von pflanzlichen und tierischen Parasiten, Energiespeicherung und Farbgebung. Sie hat durch ihre Strukturbildung und ihre positionsabhängigen Eigenschaften wesentlichen Anteil an der Funktionalität der Sinnesorgane. Demnach ist die Kutikula auch in den Informationsaustausch zwischen Individuum und Umwelt stark involviert. Dies erklärt den hochkomplexen Aufbau bis hinunter auf die molekulare Ebene.

Molekular setzt sich die Kutikula zusammen aus dem langkettigen Polysaccharid Chitin, ein Poly-N-Acetyl-D-Glukosamin, das die Faserkomponente bildet. Die variable Matrix besteht aus Proteinen, Lipiden und diversen Einlagerungen.

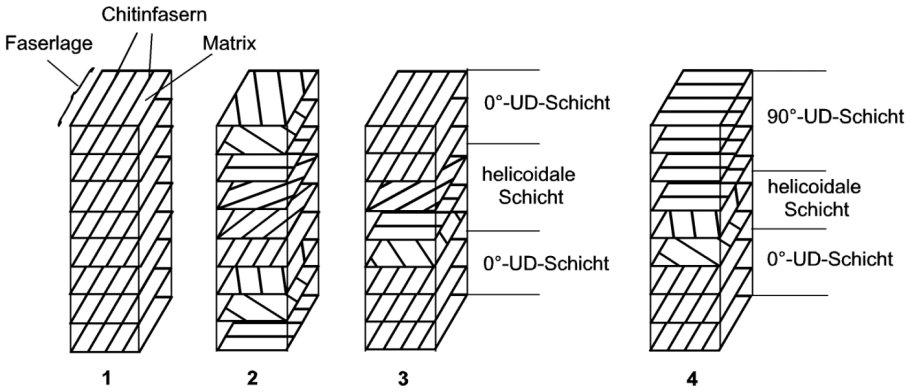


Bild 1: Schematische Darstellung möglicher Kombinationen von Chitinfaser-Anordnungen in der Insektenkutikula. Die Faserlagen enthalten jeweils parallel zueinander und parallel zur Oberfläche verlaufende Chitinfasern, die in die Matrix eingebettet sind. Mehrere Faserlagen können, je nach Abfolge zu 1) unidirektionalen bzw. 2) helicoidalen Schichten zusammengefaßt werden. Diese Schichten können dann wiederum unterschiedlich kombiniert werden, wie in den Beispielen 3) und 4) dargestellt.
1) unidirektionale Schicht: Chitinfasern verlaufen in allen Faserlagen parallel zueinander
2) helicoidale Schicht: Chitinfasern der übereinander liegenden Faserlagen sind jeweils um einen bestimmten Winkel kleiner 90° gegeneinander verdreht
3) Laminat aus abwechselnd unidirektionalen und helicoidalen Schichten, wobei die Fasern der unidirektionalen Schichten die gleiche Orientierung aufweisen (0°-Schicht)
4) pseudoorthogonales Laminat: abwechselnd unidirektionale und dünne helicoidale Schichten, die unidirektionalen Schichten sind jeweils 90° gegeneinander verdreht

Auf supramolekularer Ebene ist die Kutikula als Faser-Matrix-Verbund zu erkennen. Zur Beschreibung des Aufbaus, den Faserverlauf betreffend, existiert ein 2-Systeme-Modell [12]. Dies geht davon aus, daß innerhalb einer Faserlage die Chitinfasern parallel zueinander und parallel zur Oberfläche in der Matrix eingebettet sind. Mehrere Faserlagen werden, je nach Abfolge der übereinander gestapelten Lagen, entweder zu unidirektionalen (UD) (Bild 1, 1) oder zu helicoidalen (Bild 1, 2) Schichten zusammengefaßt. In der unidirektionalen Schicht

verlaufen die Chitinfasern in allen Faserlagen parallel zueinander. In der helicoidalen Schicht sind die Chitinfasern der übereinander liegenden Faserlagen jeweils um einen Winkel kleiner 90° gegeneinander versetzt. Diese grundlegenden Schichten können dann wiederum zu unterschiedlichen Laminaten kombiniert werden (Bild 1, 3/4).

Diesem supramolekularen Aufbau überlagert ist ein Schichtverbund. Diese horizontale Gliederung erfolgt primär in eine äußere Epikutikula und eine innere Prokutikula. Sekundär sind diese wiederum aus mehreren Schichten mit jeweils unterschiedlicher Funktion und Zusammensetzung aufgebaut. Die Prokutikula ist der chitinhaltige (Faser-) Anteil der Kutikula. Sie differenziert sich wiederum in eine äußere steife Exokutikula und eine innere elastische Endokutikula. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften beruhen im wesentlichen auf der Zusammensetzung der Matrices.

Eine laterale Gliederung ist aufgrund des positions- und funktionsabhängigen horizontalen Aufbaus sinnvoll. Hier werden z.B. „solid cuticle“, „arthrodial membrane“ und „rubberlike cuticle“ unterschieden [12].

Viele Strukturen setzen sich aus unterschiedlichen horizontalen und/oder lateralen Kutikulaanteilen zusammen und erhalten dadurch ihre Funktionsfähigkeit. Die Geometrie der jeweiligen Struktur und der Aufbau der Kutikula bestimmen hier die Funktionalität. Ein Beispiel hierfür sind die diversen Mechanorezeptoren. Die Konstruktionsweise des reizaufnehmenden Apparates, der Sensillen, ist hier auch für deren Ansprechcharakteristik verantwortlich.

Der hohe Komplexitätsgrad des Werkstoffs bis hinunter auf die molekulare Ebene macht die Analyse der mechanischen Charakteristika nur sehr bedingt möglich ([10], [11]). In der vorliegenden Studie wird auf ein numerisches Simulationsprogramm zurückgegriffen. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ist es möglich, einzelne Parameter, wie hier die Faserorientierung, zu variieren. Darüber hinaus werden Strukturvarianten generiert.

3 Modellbildung

3.1 Grundmodell

Die Wahl der Geometrie des Grundmodells fiel auf ein dünnwandiges Rohr, da diese Geometrie, zumindest in angenäherter Form, im Außenskelett der Arthropoden stark vertreten ist. Beispiele rohrförmiger Geometrien bei Insekten sind: Beinsegmente, Antennensegmente, Flügeladern bei pterygoten Insekten (geflügelt). Die Abmessungen des Modells wurden abgeleitet nach Angaben, die Jensen und Weis-Fogh [5] zu ihren Versuchen an Proben hinterer Tibien (Beinsegment: Unterschenkel) von *Schistocerca gregaria* (Wüstenwanderheuschrecke) machen. Mit dem FEM-Programm MARC/Mentat der Fa. MSC wurde das in Bild 2 gezeigte dünne Rohr mit kreisrundem Querschnitt modelliert. Es hat eine Länge von 10 mm und einen mittleren Durchmesser von 1 mm. Es werden Shellelemente (Typ 139) mit einer konstanten Dicke von 0,05 mm verwendet. Es sind 40 Elemente über die Längsachse verteilt. Über den Umfang sind gleichmäßig 16 Elemente verteilt. Auf der linken Seite (Bild 2) liegt eine feste Einspannung vor. Hier sind die Bewegungen aller Knoten in x-, y- und z-Richtung unterbunden. Es wird das Verhalten bei Biege- und Zugbelastung sowie unter Innendruck und Torsion analysiert. ([16], [17])

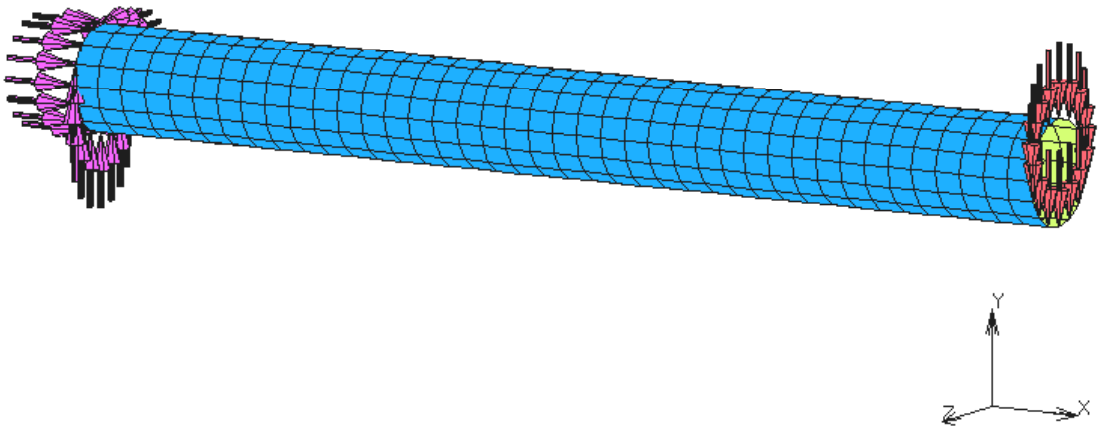
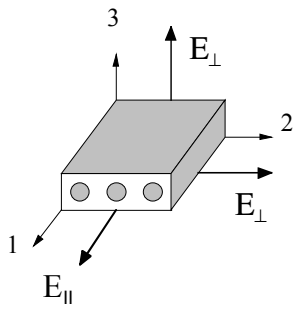


Bild 2: Darstellung des Modells „dünnes Rohr“ (Länge: 10 mm; mittlerer Durchmesser: 1 mm; Wandstärke: 0,05 mm; Shell-Elemente: Typ139) mit den Randbedingungen bei Biegebelastung. Links befindet sich die feste Einspannung, die die Bewegungen der Knoten in x-, y- und z-Richtung unterbindet. Rechts wird die Kraft von insgesamt 0,2 N in Form von Punktlasten an 16 Knoten eingeleitet. Auf den Umfang sind jeweils 16 Elemente verteilt, die eine Breite von 0,25 mm besitzen.

3.2 Materialkennwerte

Grundlage für die gewählten Materialkonfigurationen ist das 2-Systeme-Modell. Aus den zur Verfügung stehenden Angaben zu Materialkennwerten der Kutikula werden die Materialkennwerte für eine unidirektionale und eine helicoidale Schicht bestimmt. Sie werden demnach als homogene Materialien mit orthotropen Eigenschaften betrachtet. Für die beiden elementaren Materialkonfigurationen der unidirektionalen Schicht (UD-Schicht) und der helicoidalen Schicht werden die in Tabelle 1 angegebenen Materialkennwerte verwendet.

Tabelle 1: Verwendete E-Module und G-Module für den Verbund bei einem Faservolumengehalt φ von 50% [17]. Unidirektional: Material mit unidirektionaler Faseranordnung. Helicoidal: Material mit helicoidaler Faseranordnung. $E_\perp$: E-Modul 90° zur Faser; E_{II}: E-Modul parallel zur Faser; E_*: E-Modul in helicoidaler Schichtebene; G_{12}: G-Modul in alle Raumrichtungen gleich; ν_{12} Querkontraktionszahl ([8], [9]). Die Skizze einer unidirektionalen Schicht mit zugehörigen Koordinatenachsen zeigt die Orientierung von E_{II} und $E_\perp$ in einer UD-Schicht.



	unidirektional	**helicoidal**
E_{II} [N/mm^2]	44.000	-
$E_\perp$ [N/mm^2]	3.500	3.500
E_* [N/mm^2]	-	16.500
ν_{12}	0,25	0,25
G_{12} [N/mm^2]	1.140	1.140

3.3 Anordnung im Grundmodell (Materialkonfiguration)

Die fünf verwendeten Materialkonfigurationen sind in Bild 3 dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Auswahl der elementaren Materialkonfigurationen auf supramolekularer Ebene, die meist zusätzlich von einer Schichtung überlagert werden.

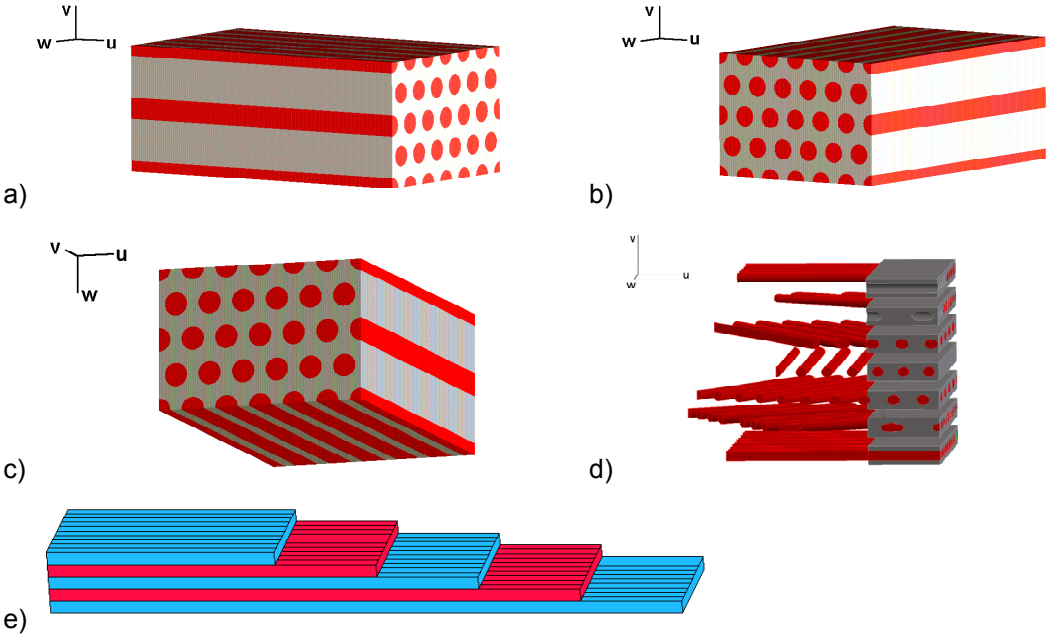


Bild 3: Schematische Darstellung der verwendeten Verbundmaterialien mit den zugehörigen lokalen Koordinatensystemen: a) longitudinale Materialkonfiguration: UD-Verbund mit Faserverlauf parallel zur Längsachse der Röhre. b) tangentiale Faseranordnung: UD-Verbund mit Faserverlauf parallel zum Umfang der Röhre (Achtung: Koordinatensystem gedreht). c) radiale Faseranordnung: UD-Verbund mit Faserverlauf parallel zum Radius der Röhre (Achtung: Koordinatensystem gedreht). d) helicoidale Faseranordnung: helicoidaler Verbund, dessen Fasern jeweils parallel zur Oberfläche der Röhre verlaufen. Die Matrix ist auf der linken Seite entfernt, damit der Faserverlauf erkennbar wird. e) laminierter Verbund: Laminat aus 3 longitudinalen und 2 helicoidalen Schichten mit jeweils gleicher Schichtdicke. Die longitudinalen Schichten sind blau die helicoidalen Schichten sind rot markiert. In den Teilabbildungen a) bis d) ist die Matrix jeweils grau dargestellt, die Fasern farbig (rot).

3.4 Lastfälle

Tabelle 2 zeigt die verwendeten Belastungen: Biegung, Zug, Innendruck und Torsion. Die aufgebrachten Belastungen sind zum Teil in Anlehnung an ([6], [7]) und [5] gewählt worden.

Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Belastungen mit der Art der Last, ihrer Größe, der Anzahl der Lastangriffsstellen sowie der Gesamtlast.

Belastung	Art der Last	Größe	Anzahl der Lastangriffsstellen	Gesamtlast
Biegung	Punktlast	-0,0125 N	16	0,2 N
Zug	Kantenlast	-18,8 N/mm	16	59,06 N*
Innendruck	Flächenlast	+0,5 N/mm^2	640	15,7 N
Torsion	Punktlast	0,2 N	16	8 N

* : in Anlehnung an Zugversuche von ([6], [7]) und [5]

3.5 Strukturmodifikationen

Nach dem Vorbild der spiralförmig verlaufenden Aderverdickungen im Adernetz des Hinterflügels von *Locusta migratoria* (europäische Wanderheuschrecke) werden Strukturvariationen vorgenommen. Ein Modell (Abbmessungen entsprechend dem Modell „dünnes Rohr“) mit spiralförmig verlaufendem Netz wird erzeugt (Bild 4 b). Die Strukturvarianten ergeben sich nun daraus, daß ein Modell aus Shellelementen (Typ 139) mit konstanter Dicke von 0,05 mm modelliert wurde und ein Modell aus Shellelementen (Typ 139) mit unterschiedlichen Dicken, die eine mittlere Wandstärke von 0,05 mm ergeben. Bild 4 a zeigt einen Ausschnitt des Wandlängsschnitts. Bei longitudinaler Materialkonfiguration wurde eine Biegelast von 1,6 N eingeleitet.

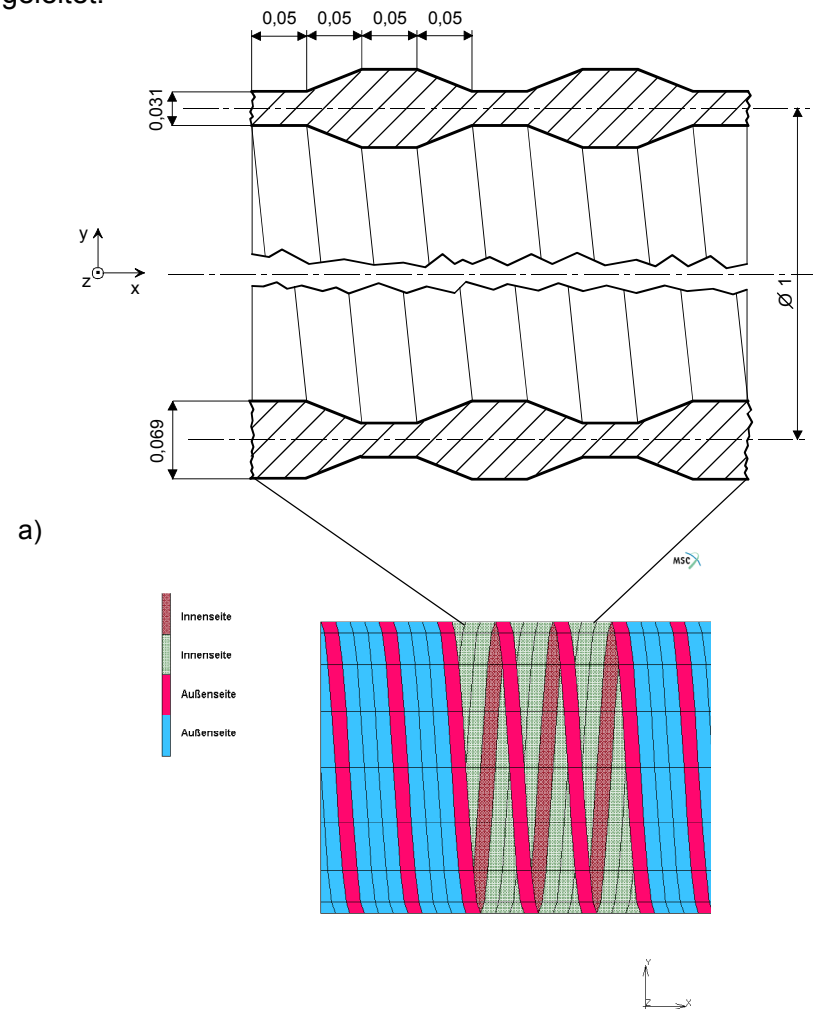


Bild 4: Ein Ausschnitt des Modells „dünnes Rohr mit spiralförmig verlaufenden Verstärkungen“ ist hier gezeigt.
a) Ausschnitt aus dem Wandquerschnitt: mittlerer Durchmesser (1 mm), Wandstärken (maximal: 0,069 mm, minimal: 0,031 mm), Breite der Elemente (0,05 mm). Das Koordinatensystem zeigt, die Lage der Geometrie im Raum.
b) spiralförmiger Verlauf der Netzgeometrie: Eine Shellelementklasse ist hier rot hervorgehoben, außerdem sind die blau dargestellten Elementklassen in einem Bereich des Modells auf der Seite des Beobachters entfernt. Hier wird dann die Innenseite der blauen und roten Shellelementklassen sichtbar. Die Farbleiste auf der linken Seite zeigt die verwendeten Farbkodierungen.

4 Ergebnisse

4.1 Materialkonfigurationen

Ausgewertet wurden die relativen Auslenkungen der Modelle für die Grundbelastungen Biegung, Zug, Innendruck und Torsion (Tab. 3). Bezugsgröße für die Auslenkungen ist dabei jeweils die Auslenkung der longitudinalen Materialkonfiguration. Bei der Biegeanalyse wird hier die y-Auslenkung betrachtet. Bei Zugbelastung ist die x-Auslenkung maßgebend. Die betrachtete Gesamtaufweitung bei Innendruck entspricht der Resultierenden aus der y- und der z-Auslenkung. Der Vergleich der Auslenkungen zeigt, daß die zugrundegelegten Materialkonfigurationen zum Teil große Unterschiede in der Steifigkeit des betrachteten Modells induzieren. Bei Torsion treten keine Unterschiede zwischen den Materialkonfigurationen auf, da die Schubmodule aller drei Raumrichtungen bei allen verwendeten Materialien gleich sind.

Tabelle 3: Vergleich der verschiedenen Materialkonfigurationen (longitudinal, helicoidal, laminiert, tangential, radial) bei unterschiedlichen Belastungen (Biegung, Zug, Innendruck und Torsion). Die zugehörigen relativen Auslenkungen des Modells sind angegeben. Diese sind Verhältnisangaben bezogen auf die Auslenkung der longitudinalen Faseranordnung. Betrachtet werden bei der Zugbelastung die Auslenkung in x-Richtung, bei der Biegebelastung die Auslenkung in y-Richtung. Bei der Gesamtaufweitung des Innendrucks handelt es sich um die Resultierende aus y- und z-Auslenkung. Beim Verdrehwinkel handelt es sich um den Winkel, um den der Knoten in bezug auf seine Ausgangsposition verschoben wurde.

	Biegung	**Zug**	**Innendruck**	**Torsion**
Faseranordnung	**relative y-Auslenkung**	**relative x-Auslenkung**	**relative Gesamtaufweitung**	**relativer Verdrehwinkel**
longitudinal	1	1	1	(1)
tangential	bis 9,2	11,33 – 12,41	0,08	(1)
helicoidal	1,71 - 2,29	2,65 – 2,66	0,21	(1)
laminiert	1,14 - 1,26	1,33	0,39	(1)
radial	5,89 - 9,94	12,50 – 12,56	1	(1)

4.2 Strukturmodifikationen

Die Simulationen haben für die untersuchte longitudinale Materialkonfiguration beim spiralförmig verstärkten Rohr im Vergleich zum Rohr mit konstanter Wandstärke eine deutlich geringere Querschnittsverengung und somit geringere Beulung bei gleicher Belastung ergeben (vgl. Bild 5).

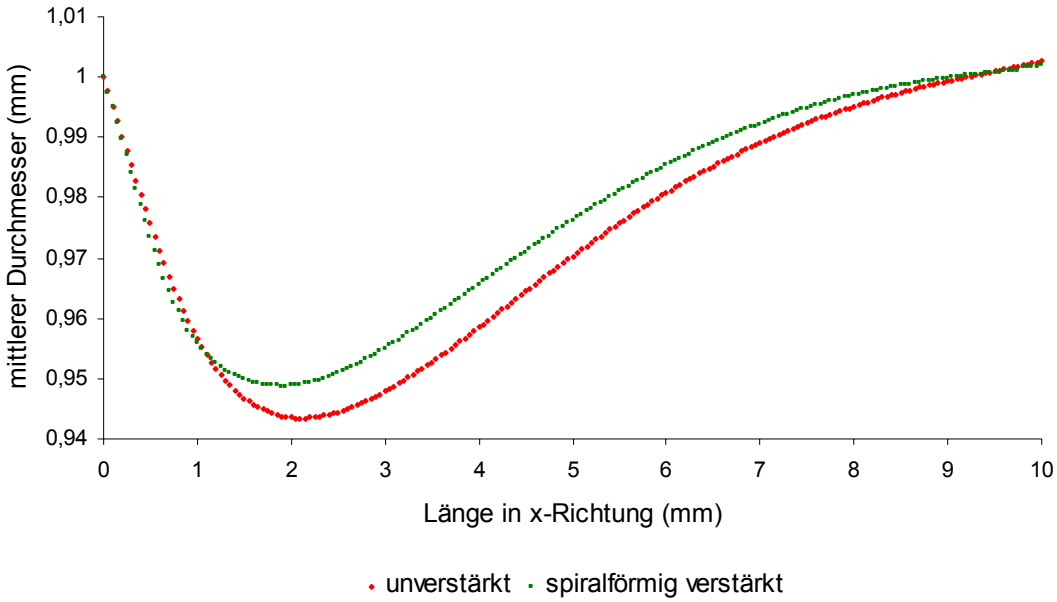


Bild 5: Unterschiedliches Strukturverhalten des Modells „dünnes Rohr mit spiralförmig verlaufendem Netz (unverstärkt)“ und „dünnes Rohr mit spiralförmig verlaufenden Verstärkungen (spiralförmig verstärkt)“ bei Biegebeanspruchung (1,6 N in negativer y-Richtung an 16 Knoten gleichmäßig eingeleitet (vgl. Bild 2)). Die mittleren Durchmesser sind in Millimetern (mm) über der jeweiligen x-Koordinate (Länge in x-Richtung) des betrachteten Knotens aufgetragen. Die longitudinale Materialkonfiguration wurde verwendet.

5 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Studie wird mit der Variation der Faserorientierung nur ein Aspekt des „Materials“ Kutikula in einem ersten noch groben Ansatz beleuchtet. Es konnten aber bereits deutliche Einflüsse der Materialkonfigurationen auf die Funktionalität der Struktur „dünnwandiges Rohr“ festgestellt werden. Gezeigt wird, daß bereits einfache Änderungen der Faseranordnung weitreichende Auswirkungen auf das Steifigkeitsverhalten haben. Die zwei sehr einfachen Grundprinzipien der Faseranordnung unidirektional und helicoidal sind, je nach Belastungsfall, innerhalb der Struktur für die verschiedensten Anforderungen geeignet. So hat beispielsweise die tangentiale Faseranordnung eine höhere Nachgiebigkeit zur Folge. Die in Intersegmentalmembranen (Gelenkmembranen) von *Locusta migratoria* zu findende tangentiale Faseranordnung ([12], [3]) könnte also wesentlich die Beweglichkeit der Membranen unterstützen. Die helicoidale Faseranordnung zeigt jeweils die zweithöchste Steifigkeit der untersuchten Materialkonfigurationen, weist jedoch in der Ebene mechanisch isotropes Verhalten auf ([4], [12], [14], [15]). Es können also mehrachsige Spannungszustände in einer Größenordnung aufgenommen werden, bei der die unidirektionalen Faseranordnungen bereits versagen. Durch die Variation anderer Parameter, z.B. der Steifigkeit der Matrix, dürften diese Effekte noch unterstützt werden, so daß sehr viele gewünschte mechanische Eigenschaften erzielt, gewissermaßen „maßgeschneidert“ werden können. Weiterführende Berechnungen, z.B. der Festigkeit, setzen zusätzliche Materialkennwerte voraus. Entsprechende Untersuchungen werden zur Zeit am Insektenflügel durchgeführt. So existieren erste Angaben zu Libellenflügelmembranen und –adern ([10], [11]).

Die Geometrie der Bauteile ist ein weiterer wichtiger Faktor, der die mechanischen Eigenschaften beeinflußt. Dünnwandige Hohlröhren haben zwar bei geringem Materialaufwand ein

hohes Flächenträgheitsmoment und damit eine hohe Biegesteifigkeit, es besteht jedoch die Gefahr des lokalen Strukturversagens (sogenanntes Brazier Buckling). Ein Konstruktionselement, das diesem fatalen Versagensfall entgegenwirkt, sind spiralförmige Verstärkungen in dünnwandigen Flügeladern von Heuschrecken (*Locusta migratoria*). Das nach deren Vorbild geschaffene Modell des spiralförmig verstärkten Rohres zeigt bei gleicher Belastung wie das Modell mit konstanter Wandstärke eine deutlich geringere Querschnittsverengung. Es besitzt damit ein geringeres Risiko des lokalen Strukturversagens. Darüber hinaus sind diese spiralförmigen Verstärkungen ein Beispiel für die Multifunktionalität von Strukturen, die bei Lebewesen stark ausgeprägt ist. Die spiralförmig verlaufenden Wandverstärkungen haben vermutlich auch fluiddynamisch positive Effekte. Es findet hier eine hydromechanische Glättung der inneren Oberfläche statt, die eine Widerstandsverminderung induziert und somit eine Reduktion der Reibungsverluste bewirkt. Hier liegt wahrscheinlich eine Mehrkriterienoptimierung vor, bei der mit möglichst geringem Materialaufwand eine hohe Steifigkeit erreicht wird und gleichzeitig die Leitbedingungen verbessert werden [8].

Wie der komplexe Prozeß der Synthese der Kutikula abläuft und auf welche Weise dabei die z.T. eng begrenzten lokalen Besonderheiten entstehen, ist noch nicht vollständig erklärbar [1]. Weitere Forschungen im biochemischen Bereich sind hier erforderlich.

Sowohl die experimentellen wie die numerischen Analyseansätze belegen, daß in der Kutikula höchst widersprüchliche Eigenschaften und Funktionen realisiert sind (geringes Gewicht, hohe Tragfähigkeit usw.), und liefern Beiträge zum Verständnis, in welcher Weise diese oft in einem einzigen „Bauteil“ realisiert sind (sensorische Funktionen usw.). Weiterführende Untersuchungen über den inneren Aufbau und die Funktionsweise der Arthropodenkutikula können daher in der Zukunft wichtige Impulse für die Entwicklung neuer Materialien und Strukturen liefern.

In bezug auf die Frage nach der Übertragung von Erkenntnissen in die Technik zeigen die Arbeiten aber in erster Linie, wie weit die Technik noch von den hochkomplexen Optimierungsergebnissen der Natur entfernt ist.

6 Literaturverzeichnis

[1] Dettner K., Peters W., 1999: Lehrbuch der Entomologie, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena Lübeck Ulm

[2] Harris B., 1980: The mechanical behavior of composite materials, Symposia of the society for experimental biology, No. 34, pp. 37-74

[3] Hepburn H. R., Chandler H. D., 1976: Material properties of arthropod cuticles: The arthrodial membranes, J. of Comparative Physiology, Vol. 109, pp. 177-198

[4] Hepburn H. R., Joffe I., 1976: On the material properties of insect exoskeletons, The Insect Integument, pp. 207-235

[5] Jensen M., Weis-Fogh T., 1962: Biology and physics of locust flight. V. Strength and elasticity of locust cuticle, Philosophical transactions of the royal society of London, Vol. 245, pp. 137-168

[6] Ker R. F., 1977: Some structural and mechanical properties of locust and beetle cuticle, (PhD-thesis unpubl.)

[7] Ker R. F., 1980: Small-scale tensile tests, The Mechanical Properties of Biological Materials, pp. 487-489, Cambridge University Press

[8] Kesel A. B., 1997: Einige Aspekte zur Statik der Insektenflügel, Biona Report 11, pp. 89-114

[9] Kesel A. B., Philippi U., Nachtigall W., 1998: Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method, Computers in Biology and Medicine, Vol. 28, pp. 423-437
[10] Kreuz P., Kempf M., Kesel A. B., Göken M., Vehoff H., Nachtigall W., 1998: Materialwissenschaftliche Analysen der Insektenkutikula am Beispiel Libellenflügel. Biona-Report 12, pp. 327-328
[11] Kreuz P., Kesel A. B., Arnold W., Vehoff H., Nachtigall W., 2000: Struktur- und Materialanalyse biologischer Systeme – Die Flügelkutikula der Insekten (Odonata, Anisoptera). Biona-Report 14, pp. 16-17
[12] Neville A. C., 1975: Biology of the arthropod cuticle, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
[13] Storch V., Welsch U., 1993: Kükenthals Leitfaden für das Zoologische Praktikum, 21. Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena New York
[14] Vincent J. F. V., 1982: Stiff Materials – Fibrous Composites, Structural Biomaterials, The MacMillian press. LTD, London
[15] Wainwright S. A., Biggs W. D., Currey J. D., Gosline J. M., 1976: Mechanical design in organisms, Edward Arnold, London
[16] Weich I., Kesel A. B., Werner H., Nachtigall W., Weber Ch., 2001: Die Kutikula der Arhtropoden: Ein Vorbild für technische Faser-Verbund-Werkstoffe, Biona Report 15
[17] Weich I., 2001: Kompositwerkstoff Arthropodenkutikula, Bestimmung der Strukturssteifigkeit ausgewählter Geometrie- und Materialkonfigurationen mit Hilfe der Finiten Element Methode, Diplomarbeit, Saarbrücken

Isabell Weich, Prof. Dr.-Ing. Christian Weber, Horst Werner
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
Universität des Saarlandes
Im Stadtwald, Gebäude 8.2
Postfach 15 11 50
D-66041 Saarbrücken
Tel: +49 (0)681/302-3607, -3075
Fax: +49 (0)681/302-4858
E-Mail: weich@cad.uni-sb.de,
weber@cad.uni-sb.de
werner@cad.uni-sb.de

Dr. rer. nat. Antonia B. Kesel
Institut für Zoologie, Technische Biologie und Bionik
Universität des Saarlandes
Im Stadtwald, Gebäude 6
Postfach 15 11 50
D-66041 Saarbrücken
Tel: +49 (0)681/302-2711
Fax: +49 (0)681/302-4610
E-Mail: a.kesel@rz.uni-sb.de