



Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Ralph Stelzer (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel
Eckhard Richter & Co. OHG
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>





KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf [sap.de/runsimple](https://www.sap.de/runsimple)

Der Panzer des Helmwasserfloh: Erfolgreiches adaptives Design in der Natur

Hans-Peter Prüfer

Kurzfassung

Der Helmwasserfloh hat im Laufe der Evolution zwei erfolgreiche Verteidigungsstrategien gegen Fressfeinde entwickelt. Dies ist zum Einen die so genannte Zyklomorphose, eine Gestaltanpassung als Antwort auf jahreszeitlich periodisch auftretende Prädatoren, und zum Anderen die induzierte Carapaxverstärkung, mit der nach dem Häutungsvorgang auf temporäre Feinde reagiert wird. In diesem Beitrag wird die Auswirkung der Carapaxverstärkung auf das mechanische Verhalten des gesamten Carapax strukturmehchanisch untersucht.

Abstract

The planctonic crustaceans *Daphnia* have developed two strategic defense devices against predators. At first there is the cyclomorphosis, a seasonal variation in body shape. In the second place we find an immediate reaction to a massive appearance of predators which results in a stronger microstructure of the carapace. The effect of the latter defense strategy is quantified by means of numerical methods of structural mechanics.

Motivation

Der Helmwasserfloh *Daphnia cucullata* ist ein beliebtes Forschungsobjekt der Evolutionsbiologie, da er aufgrund seiner vorwiegend parthenogenetischen Reproduktion einen einheitlichen Genpool ausbildet. Zwei weitere Eigenschaften machen ihn besonders interessant. Zum Einen ist die äußere Gestalt von *D. cucullata* jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen (sog. *Zyklomorphose*), zum Anderen verändert sich die innere Struktur des Panzers, des *Carapax*, bei den etwa alle zwei bis vier Tage stattfindenden Häutungen abhängig von der Anwesenheit von Prädatoren im Sinne höherer Widerstandsfähigkeit gegen Angriffe. Die Zyklomorphose ist ohne auf-

wendige Hilfsmittel leicht zu beobachten, da *D. cucullata* eine optisch gut wahrnehmbare Körperlänge von ca. 1mm aufweist. Die innere Struktur des *Carapax* ist dagegen nur mittels mikroskopischer Schnitte erkennbar, und zur Erfassung ihrer mechanischen Eigenschaften wurde ein auf Ultraschall basierendes Verfahren herangezogen. Aus dem Wunsch seitens der Biologie, eine rechnerische Bestätigung des messtechnischen Befunds zu erhalten, resultierte die weitergehende Idee, die Eigenschaften von *D. cucullata* im Sinne der Bionik konstruktiv umzusetzen. In beiden Fällen muss man für die Anpassungsmechanismen ingenieurmäßig nutzbare Modellbeschreibungen finden.

Ausgangssituation

In seiner grundlegenden Dissertation (Laforsch 2003) hat Laforsch die Verteidigungsstrategien von *D. cucullata* erstmalig in ihrer Gesamtheit betrachtet. Die jahreszeitliche Variation der äußeren Gestalt, die Zyklomorphose (Abb. 1), korreliert mit dem ebenso jahreszeitlich variierenden Vorhandensein von Prädatoren, wobei die Prädatorendichte einen zusätzlichen Einfluss bildet. Die passive Verteidigung durch Formvariationen wie Helm- und Stachelverlängerung sowie Ausbildung zusätzlicher Nackenstacheln macht den Helmwasserfloh als Beute deutlich unattraktiver, da er nach allgemeiner Auffassung nicht mehr zu den Fresswerkzeugen der Prädatoren passt. Die Zyklomorphose wird durch einen weiteren, ebenfalls passiven Verteidigungsmechanismus überlagert. Hierbei handelt es sich um eine Verstärkung des *Carapax*, die ebenfalls durch das gehäufte Auftreten von Prädatoren induziert wird. Der *Carapax* ist im Wesentlichen eine zweischalige Sandwichstruktur, bei der Innen- und Außenschale durch Pfeiler miteinander verbunden sind. Die Verstärkung wird ausschließlich durch Veränderung der Pfeiler erreicht, die länger und dicker werden (Abb. 2). Mittels Ultraschallmikroskopie wurde auf die Festigkeitseigenschaften der Schalenstruktur geschlossen. Aus diesen Messungen ergab sich eine ungefähre Verdreifachung der Festigkeit, indem die akustische Impedanz als Maß für die Härte und damit die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Angriffe interpretiert wurde.

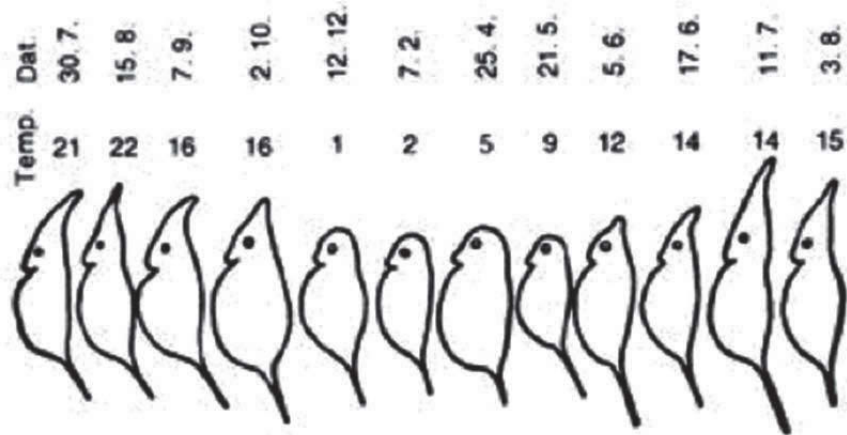


Abbildung 1: Zyklomorphose

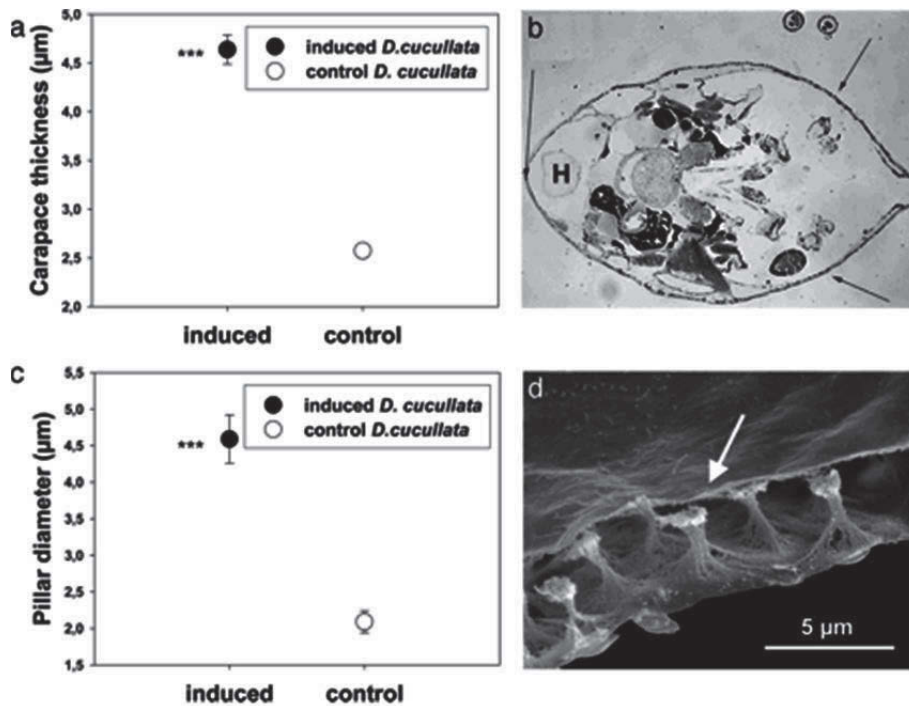


Abbildung 2: Verstärkte und unverstärkte Struktur

Die erste Modellbildung

Im Rahmen eines eher zufälligen Kontaktes zwischen dem Autor und dem Inhaber der Lehrstuhls für Evolutionsökologie und Biodiversität der Tiere der Ruhr-Universität entstand die Idee, den Grad der Carapaxverstärkung rechnerisch nachzuweisen und zu quantifizieren. Als Methode der Wahl bietet sich die FEM an, die eine flexible Modellierung beliebiger mechanischer Strukturen erlaubt. Dabei stellte es sich sehr schnell heraus, dass eine konkrete Modellierung der in der Biologie durchgeführten Experimente völlig unrealistisch ist. Bei den Ultraschallmessungen wurde ein kompletter Wasserfloh präpariert. Daraus erhält man das makroskopische Verhalten der Gesamtstruktur. Wollte man den Einfluss der Pfeilervarianten untersuchen, so müsste man einen kompletten *Carapax* mitsamt seiner Detailstruktur nachbauen – bei einer Größenordnung von 10000 Pfeilern nicht mehr sinnvoll. Als Alternative wurde daher ein kleiner Carapaxausschnitt betrachtet, mit dem Gedanken, dass sich die dort nachweisbaren mikroskopischen Eigenschaften prinzipiell auf die Gesamtstruktur übertragen lassen (Prüfer 2010).

Nimmt man die Legende in Abb. 2 wörtlich, so legen die dort verwendeten Begriffe Durchmesser und Höhe eine zylindrische Pfeilergeometrie nahe, zumal weitere Maße nicht unmittelbar verfügbar sind. Die zunächst erwogene Modellierung als Schalen, die durch Balken verbunden sind, wurde verworfen, da einerseits Kopplungen von Elementen unterschiedlicher Dimensionalität (immer noch) problematisch sind, andererseits die Pfeiler einen durchaus volumenhaften Charakter haben. Daher wurde das Modell aus Kontinuumssegmenten erstellt, was auch bei hinreichend feiner Elementierung zu noch akzeptablen Unbekanntenzahlen führte. Die beiden zugehörigen Geometriemodelle zeigt Abb. 3. Da Schädigungsmechanismen an dieser Stelle noch keine Rolle spielen, wurde ein lineares Elastizitätsgesetz angenommen. Für die Materialdaten wurde seinerzeit auf Cellulose zurückgegriffen, die sich ähnlich verhält wie Chitin, für das keine zuverlässigen Daten vorlagen.

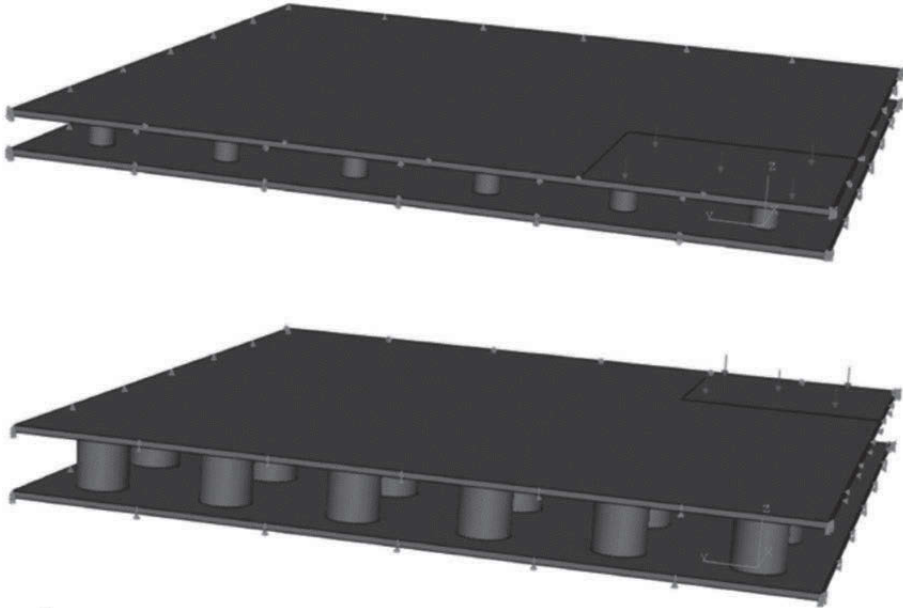


Abbildung 3: Verstärkte und unverstärkte Struktur

Bereits mit dieser stark vereinfachten Version konnte eine um dem Faktor 3 geringere Durchbiegung nachgewiesen werden, was gut zu den experimentellen Ergebnissen passt.

In einem weiteren Ansatz wurde die geometrische Modellbildung dahingehend verbessert, dass für die Pfeiler eine diabolartige Form angenommen wurde, die besser zu den mikroskopischen Aufnahmen passt und an der Übergangsstelle zu den Schalen geringere Kerbspannungen zeigt (Abb. 4). Ferner wurde die Schalendicke ebenfalls nach eingehenderer Betrachtung der mikroskopischen Befunde leicht verringert. Auch hier konnte die erwartete Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bestätigt werden (Prüfer 2011).

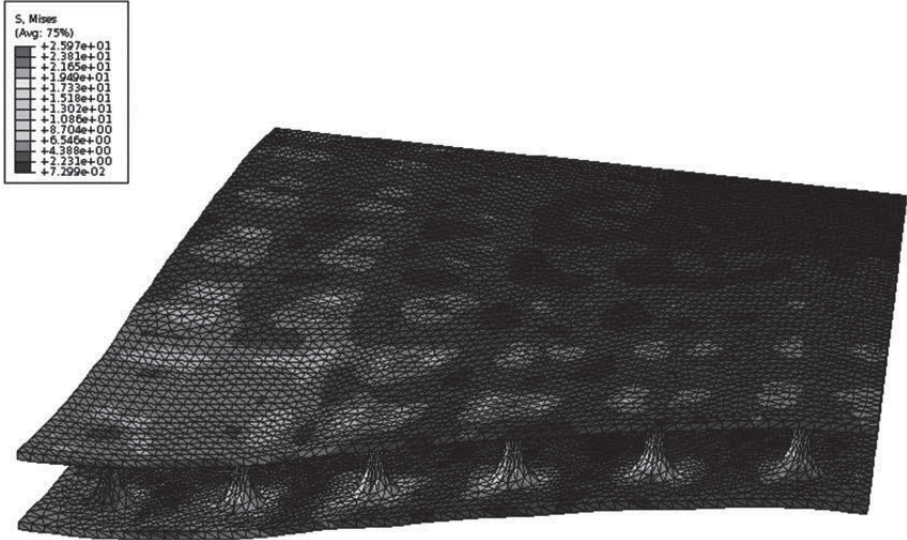


Abbildung 4: Verlagerungen und Spannungsverteilung im verbesserten Geometriemodell

Kritische Zwischenbilanz

Die bis hier geschilderten Untersuchungen stellten den ersten Versuch dar, die Befunde aus einem biologischen Forschungsprojekt mit Hilfe strukturmechanischer Methoden, also ingenieurwissenschaftlich, zu bestätigen. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die Vorgehensweise im Wesentlichen korrekt ist. Vergleichbare Effekte lassen sich auch an technisch ausgeführten Leichtbaustrukturen erkennen. Ein typisches Beispiel sind Wabenplatten, die trotz geringen Materialeinsatzes extrem biegesteif sind. Die Pfeilerstruktur des Wasserflohpanzers ist dazu dual in dem Sinne, dass hier die Hohlräume der Waben gewissermaßen durch Material ersetzt werden und umgekehrt die Wände der Waben zu Hohlräumen werden.

Ein Rückschluss auf die tatsächlichen Festigkeitseigenschaften des *Carapax* ist dagegen kaum möglich. Die Übertragung von der Beobachtung zum rechnerischen Modell enthält dafür zu viele nicht erfassbare Einflüsse und fehlerbehaftete Vereinfachungen. Die folgende Liste mag dies verdeutlichen.

- Bei den Experimenten werden präparierte Wasserflöhe verwendet. Es handelt sich also nicht um Lebendgewebe, dessen Eigenschaften vom dehydrierten Präparat abweichen dürften.
- Für die Ultraschallmessungen wird der präparierte *Carapax* einseitig mit Acrylkleber fixiert. Die durch den relativ großen Kleb-

- stofftropfen erzeugte Fesselung kann nicht befriedigend nachgebildet werden.
- Die Pfeiler sind nicht nur diaboloförmig, sondern stellen tatsächlich verdrehte Faserbündel dar. Sie sind also kein homogenes Volumen, sondern haben ein anisotropes Verformungsverhalten.
 - Die Pfeiler sind keineswegs so regelmäßig äquidistant angeordnet, wie es das einfache Geometriemodell zeigt.
 - Die Messungen sind nicht nur wie üblich fehlerbehaftet. Bei den Untersuchungen wurde jeweils ein einzelnes Exemplar aus einer Gruppe mit verstärktem bzw. unverstärktem *Carapax* ausgewählt. Dieses Vorgehen ist statistisch wenig sinnvoll, zumal die Wasserflöhe durchaus unterschiedliche Geometrien/Abmessungen aufweisen.
 - Die Materialeigenschaften von Chitin weisen eine erhebliche Schwankungsbreite auf. Sie sind messtechnisch nicht zuverlässig erfassbar (Hepburn 1975); darüber hinaus sind weder Pfeiler noch Schalen aus homogenem Material aufgebaut.

Fasst man diese Betrachtungen zusammen, so wird deutlich, dass man nur eine sehr grobe Korrelation zwischen den Eigenschaften des Rechenmodells und der realen Struktur nachweisen kann. Es ist sicher möglich, Aufschluss über das Deformationsverhalten der Panzerung des Wasserflohs bei der Erbeutung durch Fressfeinde zu erhalten. Hier sind jedoch nur tendenzielle Aussagen möglich. Auf der anderen Seite muss man sich darüber im Klaren sein, dass ja nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Beute nur schwer zu ermitteln sind, sondern ebenso die Erbeutungsmechanismen keineswegs vollständig bekannt sind. Was man – auch aus Beobachtungen – erschließen kann, ist die Tatsache, dass *D. cucullata* durch die Prädatoren vorwiegend zerquetscht wird. Damit rückt die Strukturstabilität des *Carapax* in das Zentrum des Interesses.

Überlegungen zu einer erweiterten Modellbildung

Die bis hier angestellten lokalen mikroskaligen Betrachtungen haben bestätigt, dass die *Carapax*verstärkung ebenso effektiv wie effizient ist. Für eine Untersuchung der Verteidigung des Gesamtsystems muss jedoch die Gestalt des *Carapax* möglichst vollständig erfasst werden, die ja großen Formvariationen unterworfen ist. Aus den Überlegungen zur ersten Modellierung wissen wir, dass der *Carapax* mit seiner vollständig detaillierten Mikrostruktur kaum realistisch als FEM-Modell aufgebaut werden kann. Daraus resultieren zwei Fragestellungen:

- Welcher Elementtyp ist für die Elementierung eines vollständigen *Carapax* geeignet?

— Wie lässt sich die Carapaxgeometrie beschreiben?

Für die erste Frage gibt es eine pragmatische Lösung. Der Panzer des Helmwasserfloh ist makroskopisch eine Schale, folglich bieten sich Schalenelemente an, für die allerdings auf der Basis der Voruntersuchungen geeignete Beschreibungsparameter identifiziert werden müssen, im Wesentlichen der Dickenparameter und die Materialdaten.

Schalenelemente für den *Carapax*

Wegen der geringen Dicke des *Carapax* ist die Verwendung dünner Schalen sinnvoll. Weiter ist die mikroskopische Struktur innerhalb der Schalenebene isotrop. Aus den Spannungsdehnungsdiagrammen (Abb. 5, Hepburn 1975) kann man für Chitin auf ein lineares Verhalten bis zum abrupten Versagen schließen. Die im Spannungsdehnungsdiagramm erkennbaren Einbrüche werden von den Autoren als Teilversagen der Struktur interpretiert, ähnlich dem schrittweisen Kollabieren von Schaumstoffblasen. Die Verwendung eines linear-elastischen Materialgesetzes ist daher sinnvoll. Auffällig sind die großen Unterschiede zwischen getrocknetem und feuchten Chitin. Da wiederum weder exakte Materialdaten vorliegen noch die äußeren Lasten, die zum Versagen – Bruch! – führen, bekannt sind, müssen wir uns hier erneut auf eine Tendenzbetrachtung beschränken.

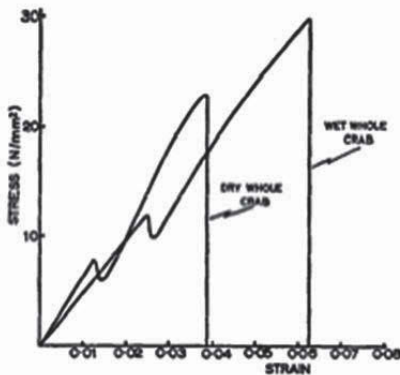


Abbildung 5: Spannungsdehnungsdiagramm für Chitin

Der Verstärkungsmechanismus des Wasserflohs manifestiert sich – ohne Betrachtung des inneren Aufbaus – als reine Dickenvariation. Die Identifikation des mikroskaligen Verhaltens mit Schalenelementen wird daher über die Idee einer äquivalenten Dicke vorgenommen. Aus der Literatur liegen allerdings nur zwei toleranzbehaftete Dickenvarianten vor. Damit ist zur Zeit

die Entwicklung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Pfeilerabmessungen und äquivalenter Dicke nicht möglich. Der Einfluss der Dicke auf das Verhalten der Gesamtstruktur kann jedoch so erschlossen werden.

Aus dem Vergleich der Verlagerungen ergeben sich die Werte

- $t = 1,12$ für den unverstärkten *Carapax*
- $t = 1,90$ für den verstärkten *Carapax*

bei Annahme einer homogenen isotropen Schale.

Die zweite Modellbildung

Mit den Überlegungen aus dem vorhergehenden Abschnitt können wir nun den gesamten *Carapax* als FE-Modell aufbauen. Aus einer CAD-Generierung (Lindhorst 2013) werden IGES-Dateien erzeugt, die als Geometrieinput für einen FE-Preprozessor dienen können. Von den erzeugten Varianten wird das Bauchmodell (Abb. 6) genutzt, da der Kopf separat betrachtet werden kann und die Schwanzpartie, die *Spina*, zwar die Erbeutung erschweren kann, aber keinen wesentlichen Beitrag zur Gestaltfestigkeit liefert.

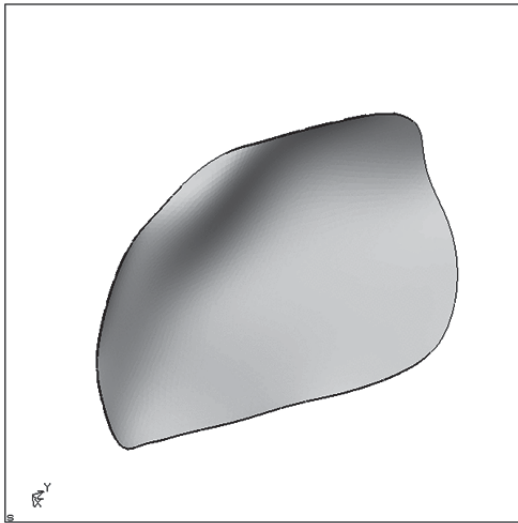


Abbildung 6: Geometrie des Bauchmodells

IGES-Dateien sind Flächenmodelle, was unserer Idee der Vernetzung mit Schalenelementen entgegenkommt. Dank der wegen der algorithmischen Erzeugung widerspruchsfreien Geometriedefinition gibt es beim Preprozessor-Import keine Schwierigkeiten. Für die Elementierung ist der zu verwenden-

dende Solver zu berücksichtigen, der den gewählten Elementtyp unterstützen muss, was keineswegs trivial oder selbstverständlich ist.

An dieser Stelle ist eine Zwischenbemerkung notwendig. Unter der Annahme eines bis zum Versagen linearen Materialgesetzes sind die mechanischen Phänomene skalierbar. Das gilt im Prinzip auch für die Geometrie. Seitens der CAD-Systeme – und dazu muss man auch die Preprozessoren zählen – wird im Allgemeinen von Abmessungen in m bzw. mm ausgegangen. Der Bauteil des Carapax, der im Folgenden betrachtet wird, hat eine Länge von etwa 500 Einheiten, in der Realität 0.5mm. Für die CAD-Modellierung aus (Lindhorst 2013) wurde aus Stabilitätsgründen mit einer Skalierung um den Faktor 1000 gearbeitet, wenn man von der Basislängeneinheit mm ausgeht. Für den Import in eine FEM-Umgebung hat das die übliche Konsequenz, dass sich der Anwender selbst – wie im Übrigen allgemein bekannt – um konsistente Einheiten zu kümmern hat. Für die im Zusammenhang mit diesem Beitrag angestellten Betrachtungen ist dieses Phänomen jedoch von geringerer Relevanz. Wie bereits bemerkt, sind die für den Erbeutungsvorgang maßgeblichen äußeren Lasten völlig unbekannt. Unter der recht plausiblen Annahme des linearen Verhaltens außerhalb der Versagensbereichs ist es deshalb zulässig, zur vergleichenden Bewertung der Verstärkungseffekte mit Einheitslasten zu arbeiten.

Aus Symmetriegründen genügt es, nur eine Hälfte des *Carapax* zu erzeugen. Dies gilt nicht nur für die Geometrie, sondern ebenso für das mechanische Modell. Bei der Erbeutung kann man zwei kritische Lastfälle annehmen. In der Schwimmlage zeigt der Rückenkiel des *Carapax* schräg nach oben. Betrachtet man einen typischen Prädator wie (Abb. 7, rechts), kann man sich den Erbeutungsmechanismus so vorstellen, dass *D. cucullata* von den horizontal beweglichen Mandibeln seitlich-mittig ergriffen und zerquetscht wird (Lastfall M). Dieser Vorgang ist ein symmetrischer Lastfall. Bei vertikalem Ergreifen an Rücken und Bauchrand, z.B. durch kleine Fische, entsteht ebenfalls eine im Wesentlichen spiegelsymmetrische Biegebeanspruchung des *Carapax* zwischen Kiel und Bauchkante (Lastfall R).

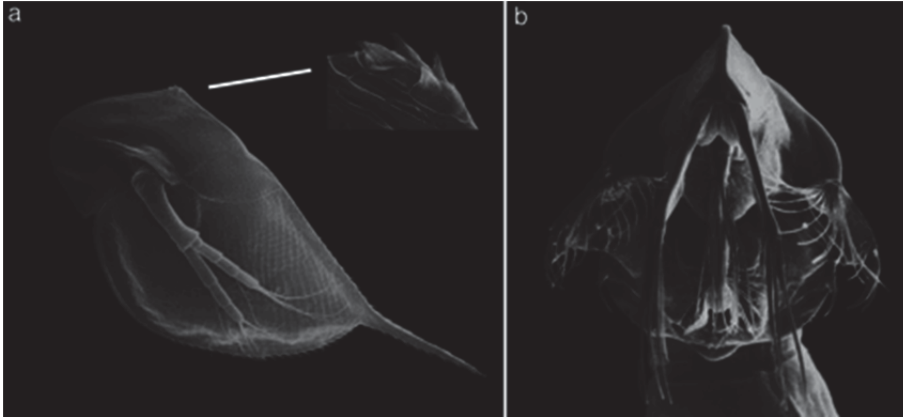


Abbildung 7: *D. cucullata* (mit Nackenstacheln) und ein typischer Prädator

Die Beschreibung der beiden ausgewählten Lastfälle als FE-Modell ist nicht vollkommen trivial. Im Bereich des Rückenkiels, wo die beiden Schalenhälften miteinander verbunden sind, kann man von einer mindestens leichten Materialanhäufung ausgehen. Die Verbindung selbst dürfte eher biegesteif sein. Bei symmetrischer Betrachtungsweise kann man hier als Randbedingung die vollständige Fesselung aller Freiheitsgrade annehmen. Um für den Lastfall M die Symmetriebedingung (bei Reduktion auf eine Halbschale) zu erzwingen, ist zusätzlich für einen noch festzulegenden Teil des restlichen Carapaxrandes eine Fesselung in z-Richtung erforderlich. Betrachtet man die Geometrie in Abb. 7, so wird deutlich, dass bei seitlichem Zusammendrücken die beiden Schalenhälften an der bauchseitigen Kante in Kontakt kommen. Es dürfte daher plausibel sein, als Näherung für das reale Verhalten eine Fesselung der Bauchkante in z-Richtung vorzunehmen. Umgekehrt würde sich die Halbschale bei Weglassen dieser Fesselung analog zu einem Kragarm verhalten, mit Maximalspannungen im Bereich des Auflagers. Für den Lastfall R gibt es keine derart einfache Analogie. Hier hängt das Verhalten der Schale davon ab, ob durch die Erbeutung der Bauchspalt verändert wird oder ob die Schalenränder in den Beißwerkzeugen des Prädators festgehalten werden. Im letzteren Szenario würde dies wieder einer Fesselung in z-Richtung entsprechen. Welcher Mechanismus hier relevant ist, lässt sich nicht feststellen. Erste Testrechnungen haben gezeigt, dass bei der z-Fesselung die Beisskraft in x-Richtung im Wesentlichen nur wie eine Druckkraft auf eine Scheibe wirkt und eine entsprechende Auflagerreaktion hervorruft. Ohne die Fesselung findet man höhere Spannungen in der Schalenmitte, die einer stärkeren Durchbiegung entspricht. Betrachtet man die Verlagerung in z-Richtung ohne die erwähnte Fesselung, so entspricht das

Ergebnis einer Öffnung der Schale, was für den Erbeutungsmechanismus wahrscheinlicher erscheint als ein Zerbrechen der Schale. Daher wird für den Lastfall R ausschließlich die Variante mit freiem Bauchrand untersucht.

Ergebnisse

Insgesamt wurden vier Varianten untersucht, nämlich die beiden Lastfälle M und R mit jeweils verstärktem und unverstärktem Carapax. Die Resultate sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Darin bezeichnen M und R die jeweiligen Lastfälle, wobei u und v für den unverstärkten und den verstärkten *Carapax* stehen. S_v und S_1 bezeichnen die Mises-Vergleichsspannung bzw. die erste Hauptspannung. Die kursiv eingetragenen Werte sind anhand der graphischen Darstellungen geschätzt. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hier keine konkreten Einheiten genannt sind, weil es sich ausschließlich um eine Tendenzbetrachtung handelt.

| | Ru | Rv | Mu | Mv |
|----------------------------|------|------|-------|-------|
| u_z max | 2.81 | 1.48 | -0.59 | -0.32 |
| u max | 3.23 | 1.70 | 0.60 | 0.33 |
| S_v max | 6.18 | 3.57 | 7.23 | 4.40 |
| S₁ max | 5.04 | 3.21 | 8.04 | 4.59 |
| S_v mitte | 1.5 | 1.0 | 2.2 | 1.3 |
| S₁ mitte | 1.1 | 0.6 | 2.5 | 1.4 |

Tabelle 1: Ergebnisübersicht

Besonders zu beachten sind die letzten beiden Zeilen. Es ist ein bekanntes Phänomen, dass Spannungsmaxima an den Auflagern zu finden sind; hierin bildet unser Modell keine Ausnahme: Die größten Werte finden wir im Bereich des Rückenkiels. Diese Werte sind insoweit mit Vorsicht zu interpretieren als die beinahe punktuellen Extrema an den Endpunkten der Fesselung lokalisiert sind. Sie dürften daher in der dort gezeigten Höhe als Artefakte zu verstehen sein. Interessanter sind die lokalen Maxima in der Mitte der Schale (in der Tabelle mit „mitte“ gekennzeichnet). Dieser Bereich scheint unabhängig vom Lastfall gefährdet zu sein (Abb. 8).

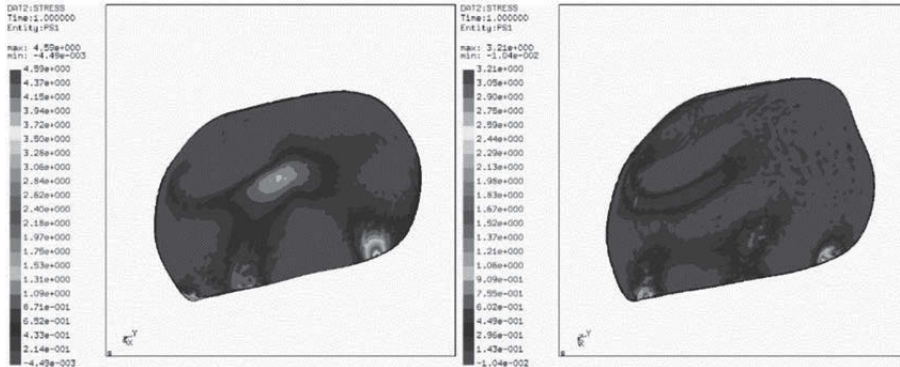


Abbildung 8: Spannungsverteilung für Lastfall M (links) und Lastfall R (rechts)

Die rechnerischen Ergebnisse für den gesamten *Carapax* bestätigen den Verstärkungseffekt durch Anpassung der Mikrostruktur. Bei konservativer Betrachtung kann man davon ausgehen, dass maximale Spannungen oder Durchbiegungen durch die Verstärkung jeweils auf die Hälfte reduziert werden. Das entspricht nicht dem Faktor 3 aus der lokalen, mikroskaligen Untersuchung. Die Vermutung liegt nahe, dass die durch die Form des *Carapax* erzeugte Strukturstabilität einen deutlichen Einfluss auf das Gesamtverhalten hat, das mit den bis jetzt vorliegenden Messergebnissen nicht separiert werden kann.

Eine weitere Bilanz

Die durchgeführten strukturmechanischen Betrachtungen sind nach wie vor mit erheblichen Ungenauigkeiten behaftet. Auch wenn man davon ausgehen könnte, dass die Geometriebestimmung hinreichend genau ist, so fehlt doch jede Verifikation für die unbekanntes Kräfte bei der Erbeutung. Ebenso kann man zwar das Strukturversagen als Bruch oder Beulen verstehen, wann jedoch das Versagen eintritt, bleibt auch deshalb offen, weil die Grenzdehnung für das Chitin nicht bestimmt werden kann. Darüber hinaus ist die isolierte Betrachtung des *Carapax* biologisch keineswegs korrekt. Innerhalb der Schalen befindet sich der eigentliche Körper des Wasserflohs mit seinen Organen, der eine zusätzliche Steifigkeit einbringt, deren Verhalten im Wesentlichen viscoelastisch sein dürfte. In erster Näherung könnte man das interne Weichgewebe als elastische Bettung auffassen. Dieser Gedanke wurde jedoch verworfen, weil er nur eine weitere, mehr oder weniger phantasievolle Schätzung von Materialdaten in das ohnehin schon stark vereinfachte Modell eingebracht hätte. Hier müssten seitens der

Biologie Aussagen zum Verhalten von Weichgewebe getroffen werden. Derartige Untersuchungen befinden sich nicht im Focus der Forschung.

Obwohl der Effekt der Carapaxverstärkung durchaus nachweisbar ist, bleibt eine Frage unbeantwortet. Außer der bei den Häutungsvorgängen stattfindenden Modifikation der internen Mikrostruktur gibt es bei *D. cucullata* die jahreszeitabhängige Zyklomorphose. Die dabei festzustellenden Veränderungen der äußeren Form hat ohne Zweifel gleichfalls einen entscheidenden Einfluss auf das mechanische Verhalten des *Carapax*. Es wäre daher erforderlich, zusätzlich verschiedene Formen jeweils mit Dickenvariationen zu betrachten, um so die Effekte separieren zu können. Derartige Untersuchungen liegen jedoch zur Zeit auch noch nicht vor.

Fasst man allerdings die hier betrachteten Strukturen im Sinne der Bionik als Vorbild für technische Entwürfe auf, so sind die bisher gezogenen Stabilitätsvergleiche zulässig. Sie geben den gewünschten Aufschluss über den Mechanismus der Verstärkungen, wobei der unbestreitbare Vorzug des Vorbildes im extrem ökonomischen, bedarfsgerechten Materialeinsatz zu sehen ist.

Fazit und Ausblick

Es ist offensichtlich, dass die Untersuchungen biologischer Strukturen mit Methoden aus den Ingenieurwissenschaften nicht die üblicherweise erwartete Exaktheit liefern können. Generell sind die Streubereiche der verfügbaren Daten sehr groß, so dass auch die Ergebnisse entsprechend streuen. Tendenzbetrachtungen sind jedoch möglich und sinnvoll. Damit lassen sich durchaus zuverlässige Aussagen über das prinzipielle Verhalten der betrachteten Strukturen erhalten, und diese kann man im Sinne der Bionik auf technische Produkte übertragen. Im Fall von *D. cucullata* hat sich die Sandwichstruktur des *Carapax* als materialsparendes Design mit Optimierungspotential erwiesen. Die Umsetzung der Mikrostruktur in berechnungstauglichere Schalenelemente zeigt, dass die mikroskaligen Verbesserungen grundsätzlich im Maßstab der Gesamtstruktur wiederzufinden sind. Eine detailliertere Untersuchung der nach wie vor vereinfachten Mikrostruktur – so wurde beispielsweise die deutlich sichtbare Faserbündelstruktur der Pfeiler vernachlässigt – kann daher zu erweiterten technischen Konzepten führen.

Dank

Ausdrücklicher Dank gebührt dem Lehrstuhl für Evolutionsökologie und Biodiversität der Tiere der Ruhr-Universität Bochum. Dem Lehrstuhlinhaber Prof. Ralf Tollrian ist es zu verdanken, dass es überhaupt zu diesen fach-

übergreifenden Untersuchungen gekommen ist. Sein Mitarbeiter Sebastian Kruppert hat durch die Vermessung des gesamten Carapax eine weitere interessante Komponente eingebracht, und mein früherer Student Felix Lindhorst hat in seiner Bachelorarbeit den Algorithmus entwickelt, um aus den so erzeugten Messdaten ein konsistentes Geometriemodell zu erzeugen.

Literaturverzeichnis

- Hepburn, H.R., Joffe, I., Green, N., Nelson, K.J. 1974: Mechanical Properties of a Crab Shell. *Comp. Biochem. Physiol.* 1975, Vol. 50A, pp. 551-554
- Laforsch, C. 2003: Morphologische Plastizität: Die Zyklomorphose bei *Daphnia cucullata*. Dissertation LMU München 2003
- Lindhorst, F. : Geometrische Modellbildung für biologische Strukturen auf Basis von CLSM-Messungen. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der Ruhr-Universität Bochum, 2013
- Prüfer, H.-P. 2010: Verteidigungsstrategien des Wasserflohs. Die Verstärkung des Carapax unter strukturmechanischen Gesichtspunkten. Deutsche SIMULIA-Konferenz 2010, Heidelberg, 20.-21. September 2010
- Prüfer, H.-P. 2011: Strukturmechanische Untersuchungen zur Carapax-Verstärkung von *Daphnia cucullata*. 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011, Rostock 6.-7. Oktober 2011

Kontakt

Dr.-Ing. Hans-Peter Prüfer
 Hasselbrinkstraße 36
 44892 Bochum
hp@itm.rub.de

