

Untersuchung additiv gefertigter Modelle nach dem Vorbild sich öffnender verholzter Früchte der Gattung *Hakea*, zum Verständnis des Öffnungsmechanismus

*Matthias Fischer, Moses-Gereon Wullweber, Heike Beismann
Westfälisches Institut für Bionik, Westfälische Hochschule, 46397 Bocholt, Germany*

Summary

Woody fruits of the species *Hakea salicifolia* open when they dry out to release seeds. The opening mechanism could serve as a model for self-actuated movements of technical components. To understand this mechanism, a 3D model is generated from μ CT scans of a dried fruit and additively manufactured, which considers only two types of tissue, namely vascular bundles and surrounding tissue. Compression tests of these specimens show an anisotropic Young's modulus, which is due to the structure of the vascular bundles and the large difference in Young's modulus of the chosen materials. The data obtained will be used to verify an FE model and to adapt it to the natural material in order to reproduce the opening of the fruit.

Zusammenfassung

Die verholzten Früchte der Art *Hakea salicifolia* öffnen sich bei Austrocknung, um Samen freizugeben. Der Öffnungsmechanismus könnte als Vorbild für selbstaktuierte Bewegungen von Bauteilen dienen. Um ihn zu verstehen, wird aus μ CT-Scans einer getrockneten Frucht ein 3D-Modell generiert und additiv gefertigt, welches nur zwei Gewebetypen, nämlich Leitbündel und umgebendes Gewebe berücksichtigt. Druckprüfungen dieser Prüfkörper zeigen einen anisotropen E-Modul, der auf die Struktur der Leitbündel und den großen E-Modulunterschied der gewählten Materialien zurückzuführen ist. Die erhaltenen Daten sollen zur Verifikation eines FE-Modells herangezogen und dieses an das natürliche Vorbild angepasst werden, um die Öffnung der Früchte nachzuvollziehen.

Natürliches Vorbild und Zielsetzung

Die verholzten Früchte der Art *Hakea salicifolia* können über viele Jahre an der Mutterpflanze verbleiben und öffnen sich erst nach Buschbränden oder Absterben des Astes, unter Freigabe der Samen [1,2]. Während des Trocknungsvorganges entstehen gerichtete Spannungen, die zu einem Aufreißen der Frucht führen [3].

Für eine Übertragung der Öffnungsbewegung auf technische Bauteile müssen die mechanischen Eigenschaften der für die Öffnung relevanten Strukturen bestimmt werden. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Trocknung von *H. salicifolia*-Früchten mit einer anisotropen Schwindung der Fruchthälften einhergeht [4]. Auf Basis von μ CT-Scans der Früchte wird erwartet, dass die 3D-vernetzte und stark verholzte Leitbündelstruktur einen entscheidenden Einfluss auf die Anisotropie der Gesamtstruktur hat und damit den Öffnungsmechanismus maßgeblich beeinflusst. Die Gewebeanteile können, aufgrund ihrer geringen Größe (Leitbündeldurchmesser $< 0,5$ mm) und schlechten Trennbarkeit, mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht einzeln mechanisch geprüft werden. Daher werden zunächst 3D-Modelle erstellt, deren mechanische Kennwerte mit den Kennwerten realer Proben abgeglichen werden. Ziel ist die Erstellung eines FE-Modells, welches den Öffnungsprozess nachvollzieht.

Vorgehensweise

Zunächst wird ein Modell eines würfelförmigen Ausschnitts der Leitbündelstruktur erstellt (Abb. 1 a-c). Dafür werden auf Basis einer KI-gestützten Segmentierung von μ CT-Aufnahmen die einzelnen Gewebe in 3D-Modelle überführt [4] und vereinfacht. Für das 3D-Modell wird davon ausgegangen, dass nur zwei isotrope Materialien entsprechend der Leitbündelstruktur mit höherem E-Modul und dem umgebenden Gewebe mit niedrigerem E-Modul vorliegen. Das 3D-Modell wird apparativ bedingt in 10-facher Vergrößerung additiv gefertigt (Leitbündelstruktur) und gegossen (umgebendes Gewebe). Anschließend wird das Modell mechanisch getestet.

Materialien und Methoden

Die Leitbündelstruktur wird aus dem Fotopolymer "Standard ABS-Like White" der Fa. Elegoo im 3D-Drucker Anycubic Photon gefertigt (Abb. 1c) und mit dem "TFC Silicon Typ 1" der Fa. Troll Factory Rainer Habekost e.K.

umgossen. Die Silikonkomponenten werden im Verhältnis 1:1 gemischt, für 1 min verrührt und Luftblasen in einem Vakuumexsikkator über einen Zeitraum von 4 min entfernt. Das erhaltene Gemisch wird in die vorbereitete Form (Abb. 1d) gegossen und die Oberseite mit Acrylglas verschlossen, sodass nach 1 Tag Aushärtezeit ein glatter Würfel mit der Kantenlänge von 5 cm vorliegt.

Nach dieser Vorschrift werden drei Modellwürfel und analog drei Würfel aus reinem Silikon hergestellt.

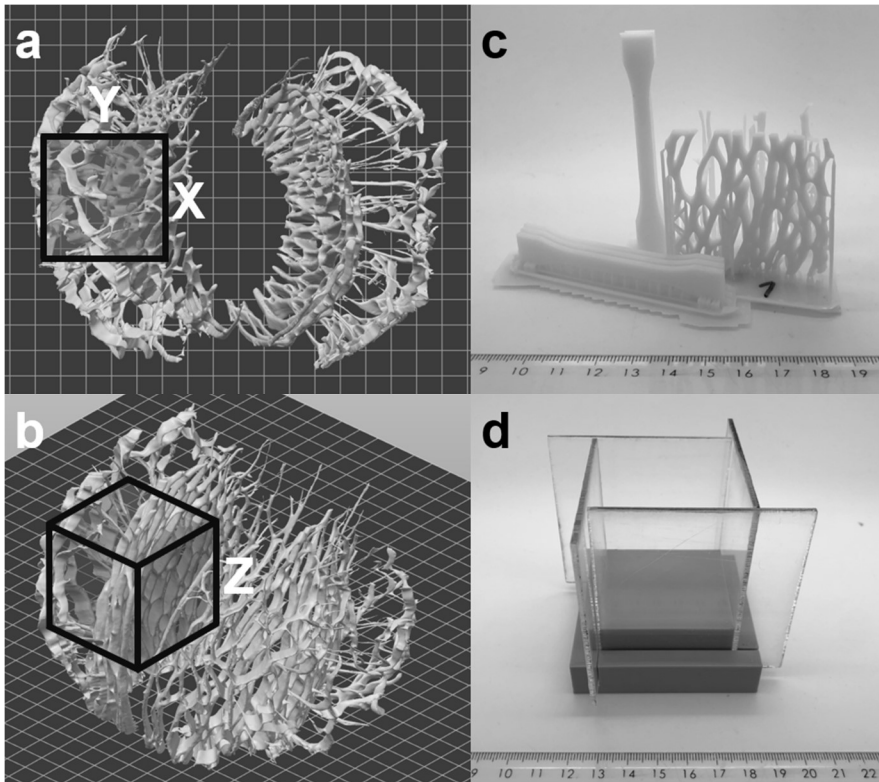


Abbildung 1: Rekonstruierte und segmentierte Leitbündelstruktur von *H. salicifolia* mit Angabe des würfelförmigen Ausschnitts, a: Draufsicht, b: isometrisch, c: mit Zugproben, d: Form für Silikoninbettung

Fertigungsbedingte Materialeigenschaften werden durch Zugstäbe des Typs 1BA (Abb. 1c) normgerecht ermittelt [5]. Die Ergebnisse aus den Druckversuchen werden mit den Untersuchungen an würfelförmigen Proben der Früchte (Kantenlänge 5 mm) verglichen [6].

Die Druckprüfungen werden auf der Universalprüfmaschine "zwickiLine" der Fa. Zwick und Roell, nach dem Anfahren einer Vorkraft von 5 N, mit 10 mm/min und einem Verfahrweg von 5 mm durchgeführt (Abb. 2a-c). Die Messungen erfolgen jeweils in drei Raumrichtungen (Abb. 3) im linear-elastischen Bereich.

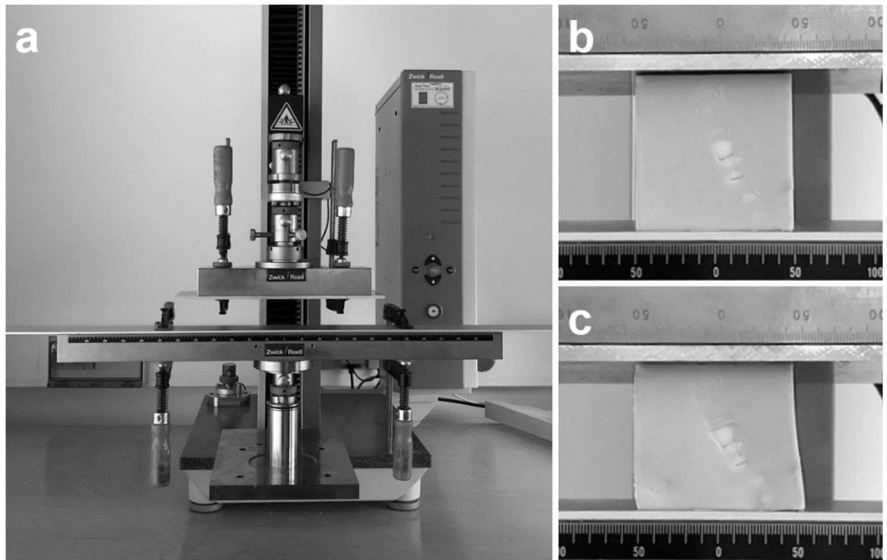


Abbildung 2: a: Prüfaufbau, b: 3D-Modell zu Beginn des Versuchs und c: nach 5 mm Verfahrweg. Maßstab gilt für mittig platzierte Proben. Die Kantenlänge des Modells beträgt 50 mm.

Ergebnisse

Die Silikonwürfel weisen einen isotropen E-Modul von $0,929 \pm 0,008$ N/mm² auf (Tab. 1).

Die Zugproben besitzen fertigungsrichtungsabhängig einen leicht unterschiedlichen E-Modul. Flachliegend beträgt er 1705 ± 57 N/mm² und stehend 1496 ± 100 N/mm².

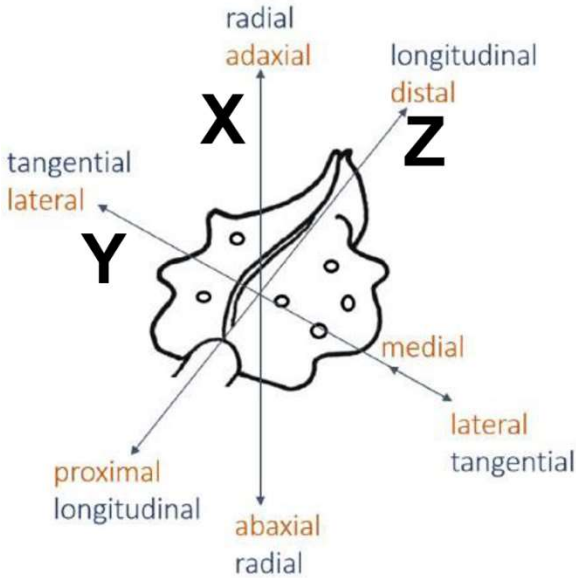


Abbildung 3: Orientierung der Raumrichtungen X, Y, Z in Bezug zu einer Frucht von *H. salicifolia* mit Angabe weiterer möglicher Benennungen.

Die Modellwürfel mit integrierter Leitbündelstruktur weisen in den drei Messrichtungen unterschiedliche E-Moduln auf, dabei liegen die höchsten E-Moduln in Z- und die kleinsten in X-Richtung (Tab. 1), wobei die maximale Streuung der Messwerte etwa 40-mal höher liegt als bei den Silikonproben (Tab 1).

Tabelle 1: E-Moduln von Silikonwürfeln, 3D-Modellen und Probenwürfel aus *H. salicifolia* in drei Richtungen

Probensorte	Prüfrichtung	E-Modul [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
Silikonwürfel Probenanzahl n=3	X	0,93	0,01
	Y	0,93	0,01
	Z	0,92	0,01
3D-Modell Probenanzahl n=3	X	1,44	0,07
	Y	2,37	0,13
	Z	4,41	0,37
Probenwürfel aus <i>H. salicifolia</i> Daten aus [7] Probenanzahl n=15	X	286	24
	Y	280	21
	Z	275	25

Diskussion

Das aus μ CT-Scans erhaltene Modell kann nach der beschriebenen Methode reproduzierbar gefertigt werden. Es basiert bisher nur auf einem Ausschnitt einer einzigen getrockneten Frucht und muss mit gedruckten Modellen anderer Exemplare verglichen werden.

Die E-Moduln für das 3D-Modell sind in den drei Raumrichtungen verschieden (Tab. 1). Diese Anisotropie resultiert aus der Leitbündelstruktur und deren zu Silikon etwa 1600-fach höheren E-Modul.

Die Proben der Früchte von *H. salicifolia* zeigen dagegen eine Anisotropie bezüglich des Schwindverhaltens [6], während die E-Moduln sich in den drei Raumrichtungen nicht signifikant voneinander unterscheiden [7]. Letzteres legt einen kleineren Unterschied der E-Moduln von Leitbündeln und umgebenden Gewebe nahe als jenen des 3D-Modells.

Auch wenn die Anisotropie des 3D-Modells nicht mit den mechanischen Kennwerten des biologischen Vorbilds übereinstimmt, erlauben die Messwerte die zukünftige Anpassung eines FE-Modells. Mit dessen Hilfe können, durch Variation der Werte und Abgleich mit den Gesamt-E-Moduln der biologischen Proben, Abschätzungen der E-Module von Leitbündeln und umgebenden Gewebe erfolgen.

Quellen

- [1] Richardson, D.M.; van Wilgen, B.W.; Mitchell, D.T. (1987): Aspects of the reproductive ecology of four Australian *Hakea* species (Proteaceae) in South Africa. *Oecologia* 71 (3), 345–354, <https://doi.org/10.1007/BF00378706>.
- [2] Williams, P.A. (1992): *Hakea salicifolia*: Biology and role in succession in Abel Tasman National Park, New Zealand. *J. R. Soc. N. Z.* 22 (1), 1–18, <https://doi.org/10.1080/03036758.1992.10420814>.
- [3] Filla, F. (1925): Das Perikarp der Proteaceae: Ein Beitrag zur Biologie der Früchte. *Flora Allg. Bot. Ztg.* 120 (1-2), 99–142, [https://doi.org/10.1016/S0367-1615\(17\)33450-X](https://doi.org/10.1016/S0367-1615(17)33450-X).
- [4] Fischer, M.; Beismann, H. (2022): 3D characterization of the complex vascular bundle system of *Hakea* fruits based on X-ray microtomography (μ CT) for a better understanding of the opening mechanism. In: *Flora* 289, S. 152035. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152035>.
- [5] DIN EN ISO 527 (2012): Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, Beuth Verlag GmbH

- [6] Herbers Igarza, L.M. (2020): Projektbericht über die Bestimmung des Schwindverhaltens der Früchte von *Hakea salicifolia*. Unveröffentlichte Projektarbeit, Westfälische Hochschule.
- [7] Frank, R. (2021): Bestimmung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Früchten der Art *Hakea salicifolia*. Unveröffentlichte Projektarbeit, Westfälische Hochschule.



Matthias Fischer

Westfälische Hochschule Bocholt

heike.beismann@w-hs.de

Diplom Chemie, Westfälische Wilhelms-Universität
Münster

2011 - 2019

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fraunhofer Institut
für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
(UMSICHT) Oberhausen

Seit 2019

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Westfälische
Hochschule