

Titel

Selbstaufrichtende Strukturen mit Formgedächtnispolymeren für den Einsatz als Folien-/Wandertunnel (SASF)

IGF-Nr.: 19820 BR

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam (IAP)



Ansprechpartner beim IAP-Potsdam:

Dr. Thorsten Pretsch

0331 / 568.1414

thorsten.pretsch@iap.fraunhofer.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19820 BR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die gute Zusammenarbeit mit vielfältiger Unterstützung des Forschungsprojekts durch Dienstleistungen sowie die Bereitstellung von Sachmitteln und Anlagen.

Ausgangssituation

Der Gartenbau hat in Deutschland eine besondere wirtschaftliche Bedeutung. Gemäß der letzten verfügbaren Datenerhebung aus dem Jahre 2008 setzten die dem Gartenbau vorgelagerten Wirtschaftszweige 1,64 Mrd € um; davon entfielen 250 Mio € auf die chemische Industrie und 260 Mio € auf die Kunststoffindustrie.[1] Im Gartenbaubereich und in der Landwirtschaft werden Gewächshauskonstruktionen wie die ortsfesten Folientunnel und die ortsvariablen Wandertunnel, die aus einem Gerüst und einer Folienbespannung bestehen, zum Verfrühen von bspw. Erdbeeren oder Spargel eingesetzt (Abb. 1).



Abb. 1 Folientunnel beim Erdbeeranbau mit Hochbeeten. Quelle: Pixabay

Ein Nachteil handelsüblicher Folien- und Wandertunnel ist, dass in solchen Konstruktionen Rundbögen aus verzinktem Stahl eingesetzt werden, die ein großes Transportgewicht aufweisen und infolge ihrer Formgebung den Einsatz spezieller Transportwagen erfordern. Ein weiteres Problem besteht darin, dass der Aufbau von Folien- und Wandertunneln sowohl sehr arbeits- als auch zeitaufwendig ist. [2] Die Baukosten für einen Hektar Folientunnel belaufen sich derzeit auf etwa 190.000 €.[3] Der Anschaffungspreis für einen Hektar Wandertunnel, die im Erdbeeranbau eingesetzt werden, lag in 2010 bei 52.000 €, wobei 40.000 € der Kosten auf das Gerüst und 12.000 € auf die Folie entfielen. [4] Unter diesen Gesichtspunkten widmet sich das Vorhaben einerseits der Einsparung von Transportgewicht/-volumina und zielt andererseits auf die Reduzierung des Montageaufwandes und der Anschaffungskosten.

Formgedächtnispolymere sind Funktionswerkstoffe mit Netzwerkstrukturen aus Netzpunkten und sogenannten Schaltsegmenten.[5] Typischerweise ändern sich die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul und Härte signifikant während die Schaltsegmente den Phasenübergang durchlaufen. Hierbei kann es sich um einen Glas- oder um einen Schmelzübergang handeln. Um ein Polymer in eine schaltbare Form zu überführen – man bezeichnet das hierfür erforderliche Verfahren auch als Programmierung – werden die oberhalb der Phasenübergangstemperatur beweglichen Schaltsegmente nach einer Umformung durch Unterschreiten der Phasenübergangstemperatur fixiert. Das Polymer verbleibt fortan in der aufgezwungenen Form, bis ein Erwärmen über die Schalttemperatur erfolgt und es daraufhin entropiegetrieben in die Ursprungsform zurückstellt.[6] Wird das Material andererseits bei niedrigen Temperaturen durch starke Kräfte plastisch verformt (kalte Programmierung), dann kann ebenfalls eine Formrückstellung allein durch das Erwärmen über die Schalttemperatur erreicht werden. In diesem Sinne verfügen die Materialien sowohl über Formgedächtniseigenschaften als auch über selbstheilende Eigenschaften.[7,8]

Formgedächtnispolymere wurden in den zurückliegenden Jahren intensiv erforscht. [6,9–11] Die auch als »Polymer Chameleons« bezeichneten Materialien zählen laut Frost & Sullivan zu den TOP 20 der Technologien mit dem höchsten Innovationspotential weltweit.[12] Zu den klassischen Anwendungen gehören die als Kabelschutz eingesetzten Schrumpfschläuche und die als Packmittel bewährten Schrumpffolien.[13,14] In der Bettenausstattungsindustrie halten polyurethan-basierte FGP in Form von Matratzen und Kopfkissen zunehmend Einzug.[15,16] Des Weiteren zeichnet sich für die Materialien ein wachsendes Interesse aus der Industrie in den Bereichen Textilien,[10,17] Biomedizin,[18,19] Sicherheitstechnik [20–22] und Antriebstechnik (Aktorik)[23–27] ab. In der F&E-Literatur werden Möglichkeiten zum Einsatz von selbstaufrichtenden Strukturen mit Formgedächtnispolymeren in der Raumfahrt diskutiert. Diese können dann zum Ausrichten eines Sonnensegels, einer Sonnenblende oder einer Antenne dienen.[28,29] Weitere Anwendungsmöglichkeiten wurden im medizinischen Bereich auf dem Gebiet der endovaskulären Behandlung zum Verschluss von Arterien[30] und darüber hinaus im Möbelbereich als selbstaufrichtenden Möbelstücke[31] erforscht. Vor diesem Hintergrund zielt der Einsatz von FGP im Gartenbau und in der Landwirtschaft darauf, eine neue Forschungsrichtung einzuschlagen.

Thermoplastische Polyurethane (TPU) gehören zu der Gruppe der phasensegregierten (Multi-) Blockcopolymeren, d. h. sie sind aus miteinander verbundenen Polymerblöcken aus harten und weichen Segmenten aufgebaut. In der Netzwerkstruktur fungieren Diisocyanate wie Diphenylmethandiisocyanat (MDI) und die als Kettenverlängerer eingesetzten kurzkettigen Diole wie bspw. 1,4-Butandiol als Hartsegmente, während die Weichsegmente aus Polyethern wie Poly(propylenglykol) (PPG) oder aus Polyestern wie Poly(butylendipat) (PBA) aufgebaut sind. [32–34] In der Polyurethanchemie wird als gängige Methode zur Verknüpfung von harten und weichen Segmenten ein zweistufiges Syntheseverfahren eingesetzt. Dabei erfolgt in einer Kondensationsreaktion die Umsetzung von einem Diol mit bspw. Adipinsäure zu einem Polyester-Präpolymer, Polyol bzw. Weichsegmentbaustein. Das Präpolymer wird anschließend mit einem Diisocyanat und einem Kettenverlängerer zur Reaktion gebracht.[35,36] Für auf diesem Wege synthetisierte und im Spritzguss verarbeitete Polyesterurethane (PEU) mit Weichsegmenten aus PBA und einem mittleren Molekulargewicht von 4.100 g/mol wurde gezeigt, dass über das Hart-/Weichsegmentverhältnis eine Kontrolle der thermischen, mechanischen und viskoelastischen Eigenschaften sowie der Formgedächtniseigenschaften möglich ist.[37]

Mit der zunehmenden Anwendungsrelevanz von FGP kommt der Erschließung neuer prozesstechnischer Verfahren eine immer wichtigere Bedeutung zu. Ein vor diesem Hintergrund wichtiger Meilenstein wurde vor kurzem erreicht. So konnten Weng et al. nachweisen, dass die Polymersynthese im Zweischnellenextruder (reaktive

Extrusion) prinzipiell für die Herstellung von PEU mit Formgedächtniseigenschaften geeignet ist.[38] Die Verarbeitung von PEU mit Formgedächtniseigenschaften im Rotationsformen wurde noch nicht nachgewiesen. Abgesehen davon ist ein zunehmendes Interesse verschiedenster Akteure erkennbar, den Marktanteil an TPU-Filamenten für die Schmelzschichtung zu erhöhen.[39] Ein Grund dafür ist sicherlich auch, dass die marktgängigen Filamente aus TPU nach unserem Kenntnisstand nicht über Funktionalitäten wie bspw. Formgedächtniseigenschaften verfügen.[40,41] Die Suche nach weiteren, für die Schmelzschichtung geeigneten FGP wird durch zunehmende Bestrebungen, smarte Materialien im 4D-Druck zu verarbeiten, vorangetrieben. Darüber hinaus sind seit einigen Jahren Verfahren zur Veredelung von FGP durch Füllstoffe in den Fokus der F&E-Arbeiten gerückt.[6,9,42,43] Fortschritte in Hinblick auf die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit konnten für verschiedene FGP durch Verarbeitungsadditive wie Aluminiumoxid, Quarzglas, Siliziumcarbid und Bornitrid erzielt werden.[43] Allerdings bietet auch hier der Markt noch keine entsprechend ausgerüsteten FGP an. Die Recyclingfähigkeit von FGP mit Ausnahme von Schrumpffolien[44] ist heute weitgehend unerforscht.

Aus den genannten Gründen erscheinen Polyesterurethane in vielerlei Hinsicht als aussichtsreiche Materialbasis für die Verwendung als multifunktionale Stellelemente in selbstaufrichtenden Strukturen und stellen einen drastischen Erkenntnisgewinn in Aussicht.

Forschungsziel

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von miniaturisierten, multifunktionalen und polymerbasierten Folien-/Wandertunnel-Systemen (Abb. 2 A) als perspektivische Alternative zu den klassischen Stahlkonstruktionen. Der Einsatz von Formgedächtnispolymeren (FGP) aus thermoplastischem Polyurethanen (Abb. 2 B) als Stellelemente ermöglicht, ein zunächst zusammenrollbares System von geringem Gewicht und Platzbedarf zu gestalten, das am Aufstellort ausgelegt und durch Wärmeeintrag – idealerweise durch Sonnenstrahlung und alternativ durch einen Wärmeträger wie Wasser oder Luft – aufgerichtet werden kann. Als weiteren Vorteil verfügen die Stellelemente über selbstheilende Materialeigenschaften. Das Vorhaben nutzt Erkenntnisse vergangener Forschungsuntersuchungen zur Polymersynthese und –verarbeitung sowie zur Umformung (Programmierung) von FGP. Somit kann zielgerichtet deren Eignung als Stellelemente für selbstaufrichtende Strukturen untersucht werden.

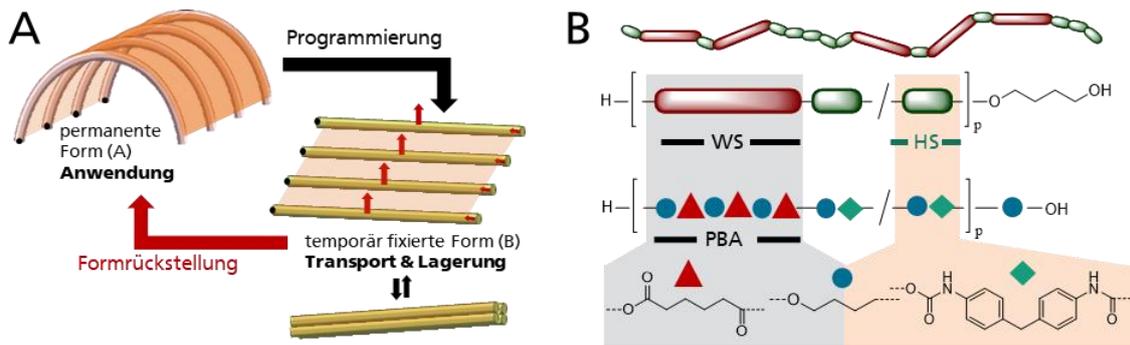


Abb. 2 Projektskizze. (A) Anwendungskonzept von selbstaufrichtenden Folientunneln und (B) Materialkonzept basierend auf TPUs mit Formgedächtniseigenschaften, welche auf molekularer Ebene modifiziert werden. © Fraunhofer IAP

Die wirtschaftlichen Vorteile einer Umsetzung von Folien-/Wandertunnel-Systemen ergeben sich für KMU aus der Einsparung von Anschaffungs-, Transport-, Montage- und Instandhaltungskosten. Der innovative Beitrag der Forschungsergebnisse besteht in der gezielten Entwicklung eines neuen FGPs, das aufgrund seiner funktionalen Eigenschaften für diese neue Anwendung prädestiniert ist. Das Maßschneidern der erforderlichen Eigenschaftsprofile kann hierbei auch durch den Einsatz von Füllstoffen und Hilfsmitteln erfolgen. Die Werkstoffverarbeitung durch Schmelzschichtung, Rotationsformen und Spritzguss stellt eine Vielzahl von Möglichkeiten in der Gestaltung der Stellelemente sicher. Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung werden Versuche zur Materialalterung, zur Wiederverwendung und zum Recycling durchgeführt. Der hier verfolgte Ansatz schafft somit direkt verwendbare Erkenntnisse und Ergebnisse für den Einsatz von FGP in selbstaufrichtenden Strukturen, die auch zur Erschließung anderer Anwendungen dienen können.

Forschungsergebnisse

In dem Forschungsvorhaben wurde die Einsatzfähigkeit von Formgedächtnispolymere aus thermoplastischen Polyurethanen (TPU) in selbstaufrichtenden Stellelementen (Rundbögen) als Bestandteil mobiler Folientunnel bzw. Gewächshäuser betrachtet. Miniaturversuche und Computer-Aided Design (CAD) (Abb. 3 A-C) erlaubten die Konkretisierung des Anforderungsprofils, eine Materialoptimierung und die erfolgreiche Entwicklung eines miniaturisierten Demonstrators unter Berücksichtigung seiner Wiederverwertbarkeit.

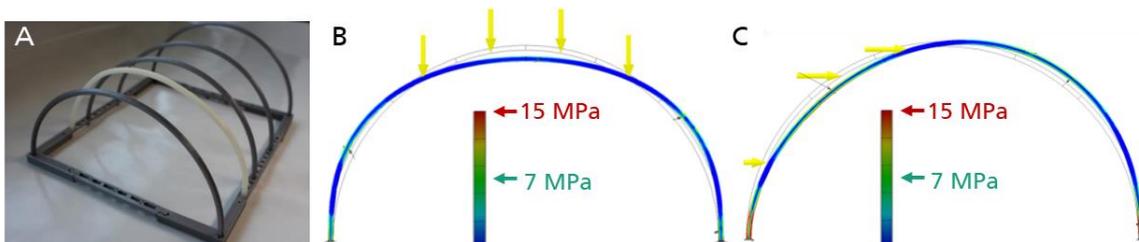


Abb. 3 Miniaturmodell (A, © Fraunhofer IAP) und veranschaulichende Stabilitätsanalyse von Rundbögen (B,C). Die Stabilitätsanalyse berücksichtigt die Grenzfälle Auflast (Schnee, B) und Seitenlast (Wind, C).

Die Eigenschaftsoptimierung der reinen TPUs erfolgte an den Weich- bzw. Schaltsegmenten (WS). Zum einen konnten für Polybutylensuccinat (PBS) als Polyester die Streckgrenze von 40 MPa (Abb. 4 A) und die Schalttemperatur von 80 °C (Abb. 4 B, T_{trans}) eingestellt und damit auf anwendungsrelevante Werte erhöht werden. Zum anderen zeigten Polyester-WS des Molekulargewichts 3.000-4.000 g/mol vielversprechende Formgedächtniseigenschaften durch gute Formfixierung (R_f) und Formrückstellung (R_r). Der optimale Hartsegment-Anteil (HS) für polyester-basierte TPUs lag zwischen 5% und 30%. Durch Einsatz eines Stabilisators ließ sich in diesem Fall die Langzeitbeständigkeit gegenüber Hydrolyse verbessern. Für Polypropylenglycol (PPG) als Polyether-WS wurden die größte Streckgrenze von 64 MPa und der größte Speichermodul von 1400 MPa nachgewiesen (Abb. 4 A, B).

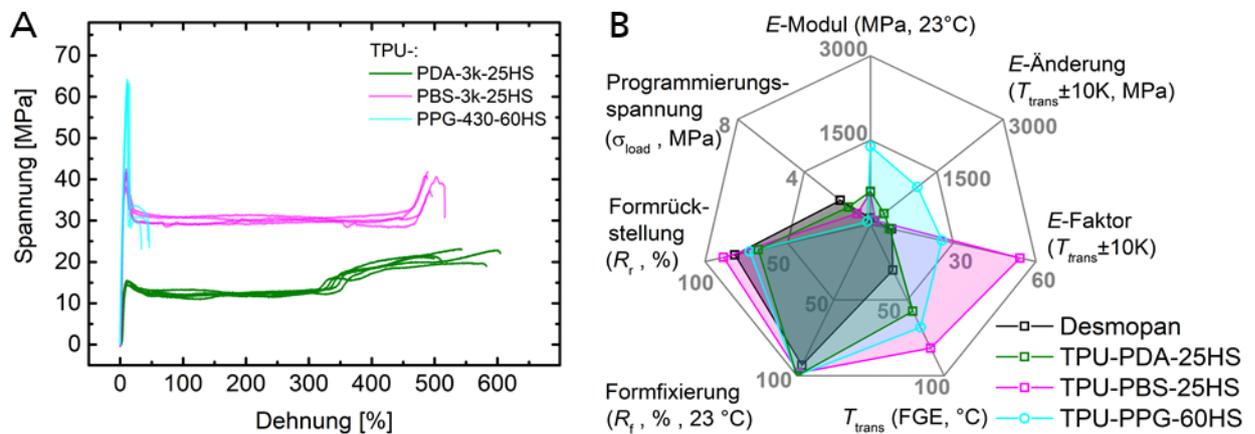


Abb. 4 Analyse von TPUs. (A) Reckverhalten im Spannungs-Dehnungsdiagramm und (B) Eigenschaftsübersicht ausgewählter TPUs einschließlich Desmopan 2795A SMP®. © Fraunhofer IAP

Die Rückstellkraft zum selbstständigen Aufrichten filigraner Stellelemente wurde u.a. durch Compoundierung erhöht. Hierbei erwiesen sich harte Fasern als besonders vorteilhaft im Vergleich zu partikulären Additiven und weichen Fasern. Ein selbstständiges Aufrichten miniaturisierter Stellelemente konnte schließlich durch den Einsatz von Rundbögen aus TPU mit Federstahlkern ($\varnothing = 0,8$ mm) erreicht werden (Abb. 5).

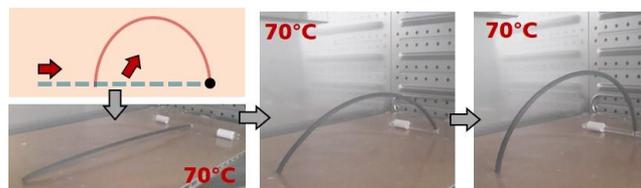


Abb. 5 Formgedächtnis-basierte Formrückstellung eines Rundbogens. Der Rundbogen besteht aus PPG-basiertem TPU und einem darin integrierten Federstahlrundbogen. Bei Raumtemperatur kann das TPU die eigene interne Spannung und die des Federstahls in der programmierten Form fixieren. Die Temperaturerhöhung auf 70 °C sorgt für eine zügige Formrückstellung und Selbstaufrichtung. © Fraunhofer IAP

Die Projektergebnisse können branchenübergreifend entlang der Wertschöpfungskette über die vorgesehene Anwendung hinaus wie z.B. für Unterstände, Möbel oder Überdachungen eingesetzt werden.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn Dr. Thorsten Pretsch (0331 568-1414).

Literatur

- [1] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Der Gartenbau in Deutschland - Daten und Fakten, 2014, www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Der-Gartenbau-in-Deutschland.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff 06.06.2015.
- [2] Linnemannstöns, L. Pillnitzer Obstbautage 2011. https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Erdbeeren_im_geschuetzten_Anbau.pdf, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [3] www.ktbl.de/online-anwendungen, Baukost Gewächshäuser, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [4] Balmer M, Baumann W, Beer M, Burmann R, Eckhard F, Fricke K, et al. Obstbau - Betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Kalkulationen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft eV (KTBL)-Datensammlung. 2010;4:36-7.
- [5] Zhao Q, Qi HJ, Xie T. Progress in Polymer Science 2015;49-50:79–120.
- [6] Pretsch T. Polymers 2010;2(3):120–58.
- [7] Santhosh Kumar KS, Biju R, Reghunadhan Nair CP. Reactive and Functional Polymers 2013;73(2):421–30.
- [8] Yuan YC, Yin T, Rong MZ, Zhang MQ. Express Polymer Letters 2008;2(4):238–50.
- [9] Sun L, Huang WM, Ding Z, Zhao Y, Wang CC, Purnawali H et al. Materials & Design 2012;33:577–640.
- [10] Hu J, Meng H, Li G, Ibekwe SI. Smart Mater. Struct. 2012;21(5):53001.
- [11] Huang WM, Yang B, Zhao Y, Ding Z. J. Mater. Chem. 2010;20(17):3367.
- [12] Frost, Sullivan. Top Technology Hypes of the Future Top Transformational Technologies to Change the Globe Beyond 2030. NE5D-MT. 2015.
- [13] Rainer WC, Redding EM, Hitov JJ, Sloan AW, Stewart WD. Patent US 3144398, Heat-shrinkable Polyethylene. 1964.
- [14] Perrone RJ., Patent US 3326869, Heat-shrinkable Articles made from Silicone Rubber–Polyethylene Compositions. 1967.
- [15] www.memoryfoampillow.sell.curiousexpeditions.org/products.html, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [16] www.mattressonline.co.uk/Product/Bodyshape-Classic-Memory-Foam-Mattress-P80, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [17] Gök MO, Bilir MZ, Gürcüm BH. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2015;195:2160–9.
- [18] L'Hocine Yahia, In Woodhead Publishing Series in Biomaterials: Shape Memory Polymers for Biomedical Applications, Woodhead Publishing, 2015.
- [19] Hearon K, Wierzbicki MA, Nash LD, Landsman TL, Laramy C, Lonneckner AT et al. Advanced healthcare materials 2015;4(9):1386–98.
- [20] Pretsch T, Ecker M, Schildhauer M, Maskos M. J. Mater. Chem. 2012;22(16):7757.
- [21] Fritzsche N, Pretsch T. Macromolecules 2014;47(17):5952–9.
- [22] Ecker M, Pretsch T. RSC Adv 2014;4(1):286–92.
- [23] Song JJ, Chang HH, Naguib HE. European Polymer Journal 2015;67:186–98.

- [24]Sun L, Huang WM, Wang CC, Ding Z, Zhao Y, Tang C et al. *Liquid Crystals* 2014;41(3):277–89.
- [25]Ge Q, Westbrook KK, Mather PT, Dunn ML, Jerry Qi H. *Smart Mater. Struct.* 2013;22(5):55009.
- [26]Bothe M, Pretsch T. *J. Mater. Chem. A* 2013;1(46):14491.
- [27]Imai S, Sakurai K. *Precision Engineering* 2013;37(3):572–9.
- [28]Sokolowski WM, Tan SC. *Journal of Spacecraft and Rockets* 2007;44(4):750–4.
- [29]Sokolowski WM, Chmielewski AB, Hayashi S, Yamada T. Cold hibernated elastic memory (CHEM) self-deployable structures. In: *Smart Structures and Materials* 1999. pp. 179–185.
- [30]Metcalf A, Desfaits A-C, Salazkin I, Yahia L'H, Sokolowski WM, Raymond J. *Biomaterials* 2003;24(3):491–7.
- [31]www.dezeen.com/2012/10/25/noumenon-by-carl-de-smet, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [32]Waletzko RS, Korley LTJ, Pate BD, Thomas EL, Hammond PT. *Macromolecules* 2009;42(6):2041–53.
- [33]Korley LTJ, Pate BD, Thomas EL, Hammond PT. *Polymer* 2006;47(9):3073–82.
- [34]Bayer O. *Angew. Chem.* 1947;59(9):257–72.
- [35]Yang Q, Li G. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 2014;52(21):1429–40.
- [36]Abouzahr S, Wilkes GL. *J. Appl. Polym. Sci.* 1984;29(9):2695–711.
- [37]Bothe M, Emmerling F, Pretsch T. *Macromol. Chem. Phys.* 2013;214(23):2683–93.
- [38]Weng S, Xia Z, Chen J, Gong L. *J. Appl. Polym. Sci.* 2013;127(1):748–59.
- [39]Frost, Sullivan. *Emergence of 3D Printing Materials*. NF19-39. 2016.
- [40]www.creativetools.se/hardware/3d-printers-and-accessories/filaments/flexible-filaments/eco-tpu-1-75, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [41]www.airwolf3d.com/shop/platinum-series-abs-filament-2-88mm-2-2lbs-123, letzter Zugriff am 15.6.16.
- [42]Meng H, Li G. *Polymer* 2013;54(9):2199–221.
- [43]Liu Y, Du H, Liu L, Leng J. *Smart Mater. Struct.* 2014;23(2):23001.
- [44]www.plastics.americanchemistry.com/Understanding-Plastic-Film, letzter Zugriff am 15.6.16.